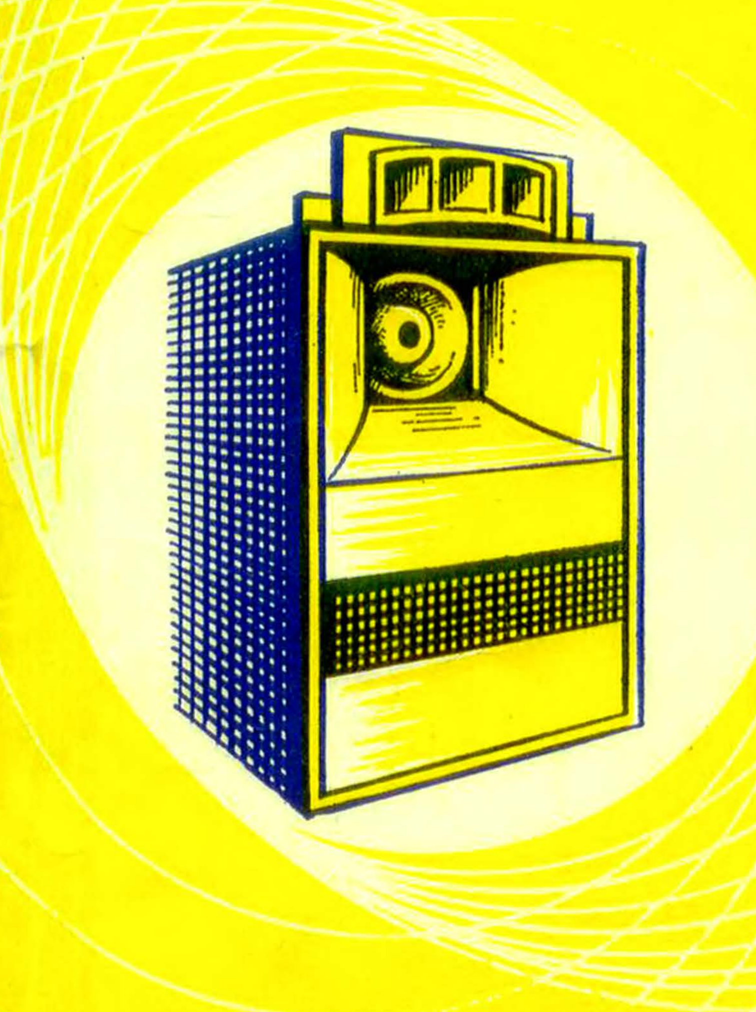
В. К. Иофе
М. В. Лизунков

БЫТОВЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



В. К. Иофе М. В. Лизунков

БЫТОВЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи со все расширяющимся в последнее время распространением бытовой звуковоспроизводящей аппаратуры, входящей как составная часть в радиоприемники, телевизоры, магнитофоны, проигрыватели, системы проводного вещания, особенно большое значение стало уделяться бытовым акустическим системам (БАС) как встроенным, так и выносным. Это вполне понятно, если учесть, что акустическая система является оконечным звеном любого тракта воспроизведения звука, в большинстве случаев определяющим качество звучания тракта в целом. Особенный интерес при этом стала вызывать аппаратура высшего класса (*Hi—Fi*). Однако и к аппаратуре низших классов в последние годы стали предъявляться повышенные требования, в частности, к качеству их звучания.

В связи с этим как за рубежом, так и в нашей стране проведены научные исследования и появилось много оригинальных конструкций, направленных на повышение качества звучания БАС. В данной брошюре сделана попытка комплексно осветить вопросы физических основ работы акустических систем разных видов и принципов их действия, параметров, определяющих их качество, рекомендуемых конструкций, их расчета, изготовления и испытаний. Изложение материала строится как на обобщении литературных данных, так и на результатах собственных исследований авторов.

Брошюра написана в форме, доступной для любителя-непрофессионала. Вместе с тем авторы не отступали от научной и технической обоснованности изложенного материала. Они надеются, что книга сможет оказаться полезной и для профессионалов — разработчиков бытовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), поскольку поможет учесть требования, налагаемые на конструкцию РЭА акустическими системами. По мнению авторов, предлагаемые новые методы расчета акустических систем могут быть использованы и их разработчиками.

Отзывы, замечания и предложения просим присылать по адресу: 101000, Москва, Почтамт, а/я 693, издательство «Радио и связь», редакция литературы по электронной технике.

Авторы

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ АНАЛОГИИ

Звук передается колебаниями частиц воздуха. Чтобы частицы воздуха могли совершить звуковые колебания, необходимо, чтобы они каким-то образом были приведены в колебательное состояние или, как принято говорить в акустике, были «возбуждены». Таким возбудителем или, иначе говоря, источником звука может быть, например, диффузор громкоговорителя, струна скрипки и т. п. Здесь колебания твердых тел (диффузор, струна) вызывают колебания частиц воздуха.

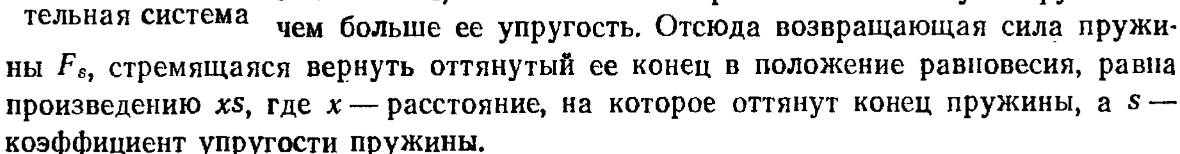


РИС. 1. Простая механическая колебательная система

Твердое тело или совокупность нескольких твердых тел, участвующих в колебаниях, называется *механической колебательной системой*. Движение этих тел характеризуется либо перемещением x какой-нибудь точки тела, либо скоростью этой точки $\dot{x}$, либо ее ускорением $\ddot{x}$.

Рассмотрим простую механическую колебательную систему (рис. 1), состоящую из массы m, укрепленной на пружине имеющей упругость s. Масса находится в вязкой среде, создающей сопротивление трения r. Если конец пружины оттянут из положения равновесия на расстояние x, то пружина стремится сократиться с некоторой силой. Очевидно, что эта сила тем больше, чем на большее расстояние оттянута пружина и чем больше ее упругость. Отсюда возвращающая сила пружины F_s, стремящаяся вернуть оттянутый ее конец в положение равновесия, равна произведению xs, где x — расстояние, на которое оттянут конец пружины, а s — коэффициент упругости пружины.

В свою очередь s определяется как $s=F_s/x$.

Отсюда единицей упругости называется упругость такой пружины, которая при растяжении на единицу длины (1 м) стремится сократиться с силой, равной также единице (1 Н)*.

Свойства пружины можно характеризовать и величиной, обратной коэффициенту упругости. Эта величина называется коэффициентом гибкости и обозначается буквой c: $c=1/s$ и соответственно $c=x/F_s$.

При перемещении тела возникают силы трения, тормозящие движение тела. При движении тела в вязкой среде значение силы трения F_r пропорционально скорости тела $\dot{x}$ и коэффициенту r, характеризующему среду, в которой возникает трение, и называемому обычно сопротивлением трения. Следует заметить, что сопротивление трения может возникать не только при движении тела в вязкой среде, но и в результате внутреннего трения, например, трения частиц в толще материала пружины при ее растяжении или сжатии.

Сопротивление трения — одна из составляющих активного механического сопротивления. Характерной особенностью реальной механической системы (обла-

* Единица силы в системе СИ — 1 ньютон (Н).

дающей активным механическим сопротивлением) является то, что в ней всегда имеет место необратимый переход механической энергии в тепловую.

Сила трения может быть выражена как $F_r = r\dot{x}$ или $r = F_r/\dot{x}$.

Единицей активного сопротивления (трения) называется такое сопротивление, которое при перемещении тела со скоростью, равной единице (1 м/с), вызывает тормозящую силу, равную также единице (1 Н). Единица активного сопротивления измеряется в кГ/с (если учесть размерность силы кГ·м/с^2).

Все тела стремятся сохранить состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Изменению этого состояния они сопротивляются с силой инерции, равной произведению массы на ускорение.

Пусть к телу с массой m (см. рис. 1) приложена сила F, направленная вниз. Под влиянием этой силы тело опустится на расстояние x от положения равновесия. При этом, кроме внешней силы F, на тело массой m действуют следующие силы: во-первых, сила инерции $m\ddot{x}$, во-вторых, тормозящая сила трения, равная $r\dot{x}$, в-третьих, сила упругости пружины sx, которая стремится вернуть тело в положение равновесия. Процесс в такой механической системе подобен процессу в цепи переменного тока, состоящей из последовательного соединения индуктивности L, активного сопротивления R и емкости C.

Это подобие отражает тот факт, что в обеих системах имеет место превращение энергии из одного вида в другой. Действительно, в механической системе кинетическая энергия движущегося тела превращается в потенциальную энергию растянутой пружины, и обратно. Часть энергии из-за наличия трения переходит в тепло. В электрической цепи энергия магнитного поля, появляющегося при прохождении электрического тока, превращается в энергию электрического поля (заряд конденсатора), и обратно. Часть энергии выделяется на активном сопротивлении в виде тепла. Поэтому масса, сопротивление трения и гибкость аналогичны соответственно индуктивности, активному сопротивлению и электрической емкости. Это подобие не является чисто внешним, формальным, а отображает физическое подобие рассматриваемых величин или, как их называют, параметров. Действительно, индуктивность в цепи препятствует как мгновенному возрастанию тока от нуля до какого-то конечного его значения при включении источника напряжения, так и спаданию тока до нуля сразу же при выключении напряжения. То же относится к массе в механической системе. Инертность тела препятствует мгновенному нарастанию скорости при приложении силы и не дает телу остановиться сразу.

Как уже отмечалось, часть энергии электрического тока благодаря наличию активного сопротивления превращается в тепло. Также превращается в тепло при наличии трения часть механической энергии. Чем больше гибкость пружины, тем бо́льшее смещение она получает при заданном значении силы. Чем больше электрическая емкость, тем бо́льший заряд создается на конденсаторе при заданном приложенном напряжении. Заряд можно рассматривать как аналог смещения, а ток, следовательно, как аналог скорости. Аналогичны также электродвижущая сила и механическая сила, первая является причиной прохождения тока, вторая — движения тела.

Отсюда по аналогии колебательная скорость тела в простой колебательной системе, на которую действует сила F, меняющаяся по синусоидальному закону с круговой частотой ω, выражается следующим образом:

$$\dot{x} = F/z_м = F/[r + j(\omega m - s/\omega)], \quad (1)$$

а ее модуль

$$|\dot{x}| = F/\sqrt{r^2 + (\omega m - s/\omega)^2}.$$

Это аналогично

$$|I| = U/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Как

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$$

является полным электрическим сопротивлением, измеряемым в омах, так

$$|z| = \sqrt{r^2 + (\omega m - 1/\omega C)^2} = \sqrt{r^2 + (\omega m - s/\omega)^2}$$

является полным механическим сопротивлением, измеряемым в механических омах (мехомах).

Подобно реактивному сопротивлению электрической цепи $[\omega L - 1/(\omega C)]$, являющегося разностью индуктивного ωL и емкостного $1/(\omega C)$ сопротивлений, в механической системе сопротивление $[\omega m - 1/(\omega c)]$ называется реактивным механическим сопротивлением и является разностью инерционного сопротивления ωm (обусловленного инертностью тела) и упругого сопротивления $1/(\omega c)$ или s/ω. Механическое реактивное сопротивление также измеряется в мегомах.

В электротехнике и акустике синусоидально изменяющиеся величины (сила, смещение, скорость, ускорение и т. д.) принято измерять в действующих значениях, которые в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных. Укажем, что абсолютные значения амплитудных (и соответственно действующих) значений смещения x, скорости $\dot{x}$ и ускорения $\ddot{x}$ связаны между собой соотношениями:

$$\ddot{x} = \omega^2 x \quad \text{или} \quad \ddot{x} = \omega\dot{x} \quad \text{и} \quad \dot{x} = \omega x. \tag{2}$$

В дальнейшем, если не будет оговариваться иное, мы будем пользоваться именно действующими значениями этих и других величин.

Смещение при колебательном движении измеряется в обычных единицах длины (м), колебательная скорость — в обычных единицах скорости (м/с), а ускорение при этом движении — в обычных единицах ускорения (м/с^2).

Из приведенных соотношений можно сделать вывод, что для достижения одной и той же амплитуды колебательной скорости $\dot{x}$ требуется малое смещение на высокой частоте колебаний и большое смещение на низкой частоте.

Рассматривая выражение для скорости при различных значениях частоты, видим, что если реактивное механическое сопротивление равно нулю, то скорость будет максимальной. Это произойдет на частоте, называемой частотой резонанса, которая для механической системы

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{mc} = \sqrt{\frac{s}{m}}.$$

Следовательно, резонансная частота механической системы будет тем выше, чем больше ее упругость и меньше масса, т. е. чем более жесткой и легкой окажется система. Наоборот, чем тяжелее и гибче система, тем ниже ее собственная частота. Это подтверждается повседневным опытом. Жесткая легкая стальная полоска, зажатая в тисках, имеет высокую резонансную частоту. Большая масса на гибких амортизаторах, например автомашина на рессорах, имеет низкую резонансную частоту.

Нетрудно видеть, что вблизи резонанса скорость системы, по существу, определяется активным сопротивлением (сопротивлением трения), так как в этой области реактивное сопротивление весьма мало и им можно пренебречь по сравнению с активным. Если активное сопротивление в системе невелико, то в области частот ниже резонансной колебательная скорость определяется в основном упругостью или, точнее, упругим сопротивлением s/ω, а в области частот выше резонансной — массой или, точнее, инерционным сопротивлением ωm. В первом случае полное механическое сопротивление определяется упругим, а во втором — инерционным сопротивлением. В соответствии с этим говорят, что система управляется упругостью, массой или активным сопротивлением.

Аналогия между механической колебательной системой и электрической цепью позволяет изображать механические системы с помощью аналогичных им электрических схем, рассчитывать и исследовать схемы и полученные результаты вновь переводить на язык механических величин. Этот прием называется методом электромеханических аналогий и широко используется в электроакустике.

Разобранная аналогия между простой механической колебательной системой и последовательным соединением индуктивности, емкости и активного сопротивления является простейшей. На практике приходится встречаться с гораздо более сложными системами и аналогиями. В особенности затрудняется подыскание аналогов, когда механическая система состоит не из сосредоточенных масс, упругостей, сопротивлений, а из распределенных, что имеет место, например, в колеблющихся струнах, мембранах, пластинках, балках и т. п., где каждый малый элемент колеблющегося тела обладает и массой, и упругостью, и трением.

Чтобы показать, как составляются схемы аналогии, рассмотрим следующий пример. Дана механическая система (рис. 2), состоящая из масс m_1 и m_2, которые соединены пружиной, обладающей гибкостью c. На массу m_1 действует сила F.

Поскольку электрической аналогией силы является э. д. с., то в схеме аналогии сила отображается э. д. с., действующей непосредственно на массу m_1. После массы m_1 следуют элементы c и m_2, которые можно соединять либо последовательно, либо параллельно. Если они соединены последовательно, то при очень малом значении гибкости c упругое сопротивление велико, и, следовательно, тока в цепи не будет. В переводе на язык механики это означает, что, несмотря на приложенную силу, система не колеблется. Вместе с тем малое значение гибкости c означает, что массы m_1 и m_2 жестко соединены, как бы слиты в одну массу, что не допускает отсутствия колебаний в системе.

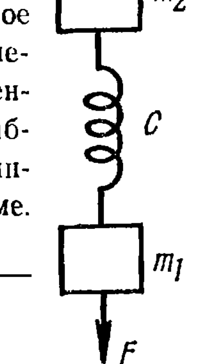


РИС. 2. Механическая колебательная система

Соединим теперь c и m_2 параллельно (рис. 3). При таком соединении малое значение гибкости c никак не препятствует колебаниям в системе. Если, наоборот, положить, что c весьма велико (очень слабая пружина, волосок), то малое упругое сопротивление зашунтирует в схеме аналогии m_2 и эта масса при этом колебаться не будет. К этому же заключению можно прийти и не прибегая к схеме аналогии. Действительно, если сила действует на массу m_1, то ее колеба-

ния практически не будут передаваться массе m_2, если она соединена с массой m_1 посредством очень гибкой (малоупругой) пружины. Таким образом, придавая параметрам механической системы либо очень большие, либо очень малые значения, можно убедиться в том, что схема аналогии (рис. 3) составлена правильно.

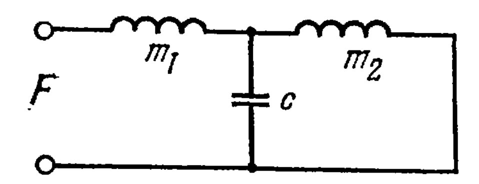


РИС. 3. Схема аналогии механической колебательной системы по рис. 2.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ И ИХ ВИДЫ

Применяемые в электроакустике аппараты являются преобразователями одного вида энергии в другой. Например, подводимая к зажимам громкоговорителя электрическая энергия частично затрачивается на нагрев проводника и, таким образом, превращается в тепловую, а частично превращается в механическую энергию колебаний подвижной системы громкоговорителя. Для выяснения сущности процесса преобразования одного вида энергии в другой и связи между электрической цепью и механической колебательной системой преобразователя рассмотрим для примера наиболее распространенный в электроакустике электродинамический принцип преобразования.

Из электротехники известно, что если поместить в магнитное поле проводник с током, то он начнет двигаться в направлении, определяемом правилом левой руки. Например, пусть проводник имеет форму плоского витка, в котором ток направлен по часовой стрелке, а магнитные силовые линии направлены по радиусам от центра витка. Тогда сила, которая действует на виток, окажется направленной вверх. При перемене направления тока на обратное сила, действующая на виток, также изменит свое направление. Поэтому, если в проводнике будет протекать переменный ток, то проводник будет колебаться. Наоборот, если виток, находящийся в магнитном поле, колеблется под влиянием какой-либо действующей на него силы и перерезает при этом магнитные силовые линии, то в нем будет индуктироваться э. д. с. Если виток замкнуть, то в цепи потечет ток. Рассмотрим несколько подробнее явления, происходящие при электродинамическом способе преобразования.

Если приложить к катушке, состоящей из нескольких витков и находящейся в магнитном поле, переменное напряжение U, то она начинает колебаться под действием возникающих сил. При этом в витках катушки, которая пересекает магнитные силовые линии, индуктируется э. д. с. Направление э. д. с. по правилу Ленца таково, чтобы противодействовать причине, ее вызвавшей, т. е. приложенному напряжению. Значение противо-э. д. с. равно $Bl\dot{x}$, где B — магнитная индукция, Тл; l — длина проводника катушки; м; $\dot{x}$ — скорость движения катушки, м/с. Если обозначить электрическое сопротивление катушки через R, то по закону Ома ток в ней

$$I = (U - Bl\dot{x})/R. \qquad (3)$$

Скорость движения катушки согласно (1) определяется как частное от деления силы F на полное механическое сопротивление $z_м$. Сила, движущая проводник в магнитном поле, равна, как известно,

$$F = BlI. \tag{4}$$

Отсюда $\dot{x} = F/z_м = BlI/z_м$.

Подставляя значение скорости $\dot{x}$ в (3), получаем

$$I = \frac{U - (B^2 l^2/z_М) I}{R}. \tag{5}$$

Решая это уравнение относительно I, имеем

$$I = U/(R + B^2 l^2/z_М). \tag{6}$$

Таким образом, при механических колебаниях катушки с током в магнитном поле в ней возбуждается противо-э. д. с., вследствие чего в цепи катушки электрическое сопротивление R как бы увеличивается на значение $B^2l^2/z_м$, называемое вносимым электрическим сопротивлением

$$Z_{вн} = B^2 l^2/z_М = K^2/z_М, \tag{7}$$

где K — коэффициент электромеханической связи.

Вносимое сопротивление обратно пропорционально механическому сопротивлению. Например, если механическое сопротивление катушки равно бесконечности, то вносимое сопротивление равно нулю. Это становится понятным, если учесть, что при бесконечно большом механическом сопротивлении катушка находится в покое, и, следовательно, в витках ее не возбуждается противо-э. д. с.

Итак, сопротивление, вносимое из механической системы в электрическую цепь или из электрической цепи в механическую систему, отражает связь этих систем и их взаимодействие. Ясно, что взаимодействие это тем больше, чем больше коэффициент электромеханической связи K. Попытаемся глубже выяснить природу вносимого сопротивления. Для простоты предположим, что механическое сопротивление чисто активно ($z_М = r$). Тогда (3) можно переписать в виде:

$$I = U/(R + K^2/r) = U/(R + r_{вн}). \tag{8}$$

Умножая обе части на I и преобразуя, получаем:

$$UI = I^2 R + I^2 r_{вн}. \tag{9}$$

Очевидно, что левая часть равенства — электрическая мощность, подводимая к катушке, а в правой части равенства — член I^2R представляет собой мощность, затрачиваемую на нагрев проводника, и член $I^2r_{вн}$ — часть подведенной электрической мощности, преобразованной в механическую и затраченной в механической системе на преодоление трения.

Если электрическое и механическое сопротивления реактивны, то в правой части выражения (9) получим сумму величин — кажущейся электрической мощности в катушке и кажущейся электрической мощности, перешедшей в кажущуюся механическую мощность.

Таким образом, вносимое сопротивление отображает ту часть подводимой мощности, которая преобразовывается в другой ее вид.

Аналогично могут быть получены выражения для коэффициента электромеханической связи и вносимого сопротивления для электростатического и пьезоэлектрического преобразователей.

Электростатический преобразователь состоит из неподвижной и подвижной обкладок, находящихся на расстоянии d. При приложении к ним постоянного напряжения U_0 и переменного напряжения частоты ω подвижная обкладка начнет колебаться с той же частотой Коэффициент электромеханической связи будет

$$K = U_0/(\omega d). \qquad (10)$$

Для пьезоэлектрического преобразователя с изгибной деформацией, представляющего собой пластинку длиной l и толщиной h, колеблющуюся при приложении к ней переменного напряжения частоты ω, коэффициент электромеханической связи будет

$$K = K_0\, l^2/(\omega h^2),$$

где K_0 — коэффициент пьезоэффекта.

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ В СРЕДЕ

Рассмотрим процесс возникновения и распространения колебаний в воздушной среде.

Пусть имеется бесконечно большая жесткая стенка C, в которой может передвигаться вправо и влево относительно своего положения равновесия поршень $П$ (рис. 4). Пусть, например, в данный момент поршень идет вправо, толкая находящиеся перед ним частицы воздуха. Частицы, отклоняясь от своего положения равновесия, в свою очередь толкают частицы, находящиеся вправо от них, т. е. следующие за ними и т. д. Справа от поршня образуется сгущение воздуха или область с повышенным атмосферным давлением. Толчки от одной частицы воздуха к другой передаются все дальше от поршня, вследствие чего вправо от него распространяется сгущение. Пусть теперь поршень после того, как он достиг своего крайнего правого положения, начал передвигаться влево. Тогда перед ним образовывается разрежение воздуха, или область с пониженным атмосферным давлением. Поскольку у поверхности поршня создалась область разрежения, туда устремятся примыкающие к ней частицы воздуха. На том месте, где они находились, в свою очередь образуется область разрежения, в которую устремятся другие, примыкающие к этой области, частицы воздуха. В результате вправо от поршня будет распространяться разрежение. Таким образом, колебания поршня периодически вызывают во внешней среде (воздухе) возмущения в виде сгущения и разрежения, причем одному периоду колебаний (движение поршня вперед и назад) соответствует одно сгущение и одно разрежение.

Давление p, измеренное в какой-то определенной точке среды, окружающей поршень, изменяется в зависимости от времени по закону, подобному закону движения поршня. При колебательном движении поршня давление в рассматриваемой точке сначала нарастает, становясь больше атмосферного давления p_0, а затем спадает до значения меньшего, чем атмосферное давление, и, наконец, опять увеличивается до значения p_0.

Графически процесс изменения давления во времени в данной точке среды изображен на рис. 5, который соответствует движению поршня, совершаемому по синусоидальному закону. Значение давления в каждый момент времени на-

зывается его мгновенным значением. Давление в каждой данной точке можно представить в виде суммы двух составляющих: постоянной, равной атмосферному давлению, и накладывающейся на него переменной. Последняя обычно называется звуковым давлением Период изменения давления T равен периоду колебаний поршня. Амплитуда же звукового давления пропорциональна амплитуде колебаний поршня. Заметим, что на рис. 5 амплитуда звукового давления сильно преувеличена по сравнению со значением атмосферного давления из-за невозможности изобразить величины давлений в истинном соотношении, так как амплитуда звукового давления даже самых громких звуков составляет меньше одной тысячной доли от величины атмосферного давления.

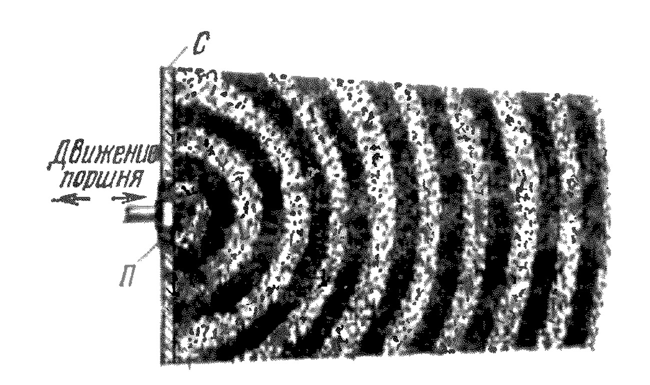


РИС. 4. Образование звуковых волн в среде

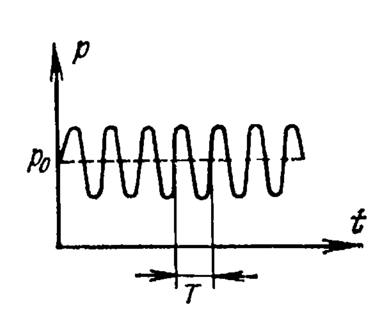


РИС. 5. Зависимость давления в среде от времени

Звуковое давление, как и всякое давление, измеряется силой, действующей на единицу площади. Поэтому в акустике за единицу звукового давления принято такое давление, при котором на площадь в 1 м² действует сила, равная 1 Н. Эта единица звукового давления называется паскаль (Па). Паскаль является удобной единицей измерения, так как в большинстве случаев значения звукового давления изменяются от сотых долей паскаля до нескольких его единиц. Звуковое давление при средней громкости разговора составляет доли паскаля. Среднее атмосферное давление, соответствующее давлению ртутного столба высотой 760 мм, составляет приблизительно 10^5 Па.

Как и другие акустические величины, звуковое давление также измеряется в действующих значениях.

Состояние среды в рассматриваемой точке можно охарактеризовать не только изменением давления в ней, но и скоростью частиц воздуха или смещением их относительно положения равновесия. При синусоидальных колебаниях поршня кривые скорости или смещения частиц в зависимости от времени имеют также синусоидальную форму.

На рис. 6 изображено изменение во времени скорости частиц, обычно называемой в акустике колебательной скоростью. Колебательная скорость $\dot{x}$ в разные моменты времени имеет разные значения и знаки. Таким образом, в звуковом поле каждая частица среды находится в определенной фазе колебаний.

Итак, колебания источника звука (например, поршня) вызывают в среде сгущения и разрежения. Область, в которой наблюдаются сгущения и разрежения, называется звуковым полем. Сгущения и разрежения распространяются в среде с определенной скоростью, называемой скоростью распространения звука.

Ее значение зависит от характера и состояния среды. Так, скорость звука в газовой среде:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho}}, \qquad (11)$$

где p_0 — постоянное (атмосферное) давление; γ — показатель адиабаты, т. е. отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости газа при постоянном объеме. Это отношение для воздуха равно 1,4; ρ — плотность воздуха, равная при 0° С и 760 мм рт. ст. 1,3 кг/м^3.

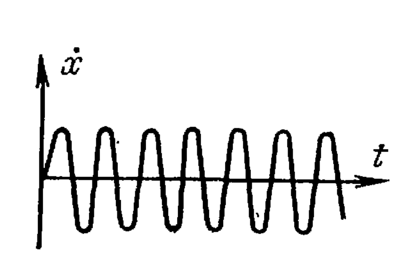


РИС. 6. Зависимость колебательной скорости в среде от времени

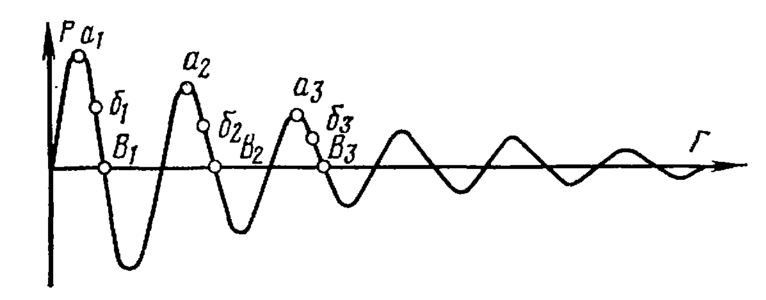


РИС. 7. Зависимость звукового давления от расстояния до источника

Для воздуха при этих условиях скорость распространения звука равна 331 м/с, а при 20° С она повышается до 344 м/с.

Скорость звука никоим образом не следует смешивать с колебательной скоростью частиц среды. Колебательная скорость частиц среды в зависимости от различных условий (например, от амплитуды, частоты колебаний источника звука) может иметь разные значения, при этом во много раз меньшие скорости распространения звука. Процессы колебаний частиц среды и распространения звука различны и по существу. В то время как звук при отсутствии препятствий может распространяться в среде сколь угодно далеко от источника, частицы среды колеблются около своего положения равновесия и поступательного движения не имеют.

Если одновременно измерить звуковое давление в различных точках прямой в направлении распространения звука, то с помощью полученных значений можно построить кривую зависимости звукового давления p от расстояния r. При синусоидальных колебаниях источника звука эта кривая имеет показанную на рис. 7 форму, также близкую к синусоиде. Правда, полученная кривая будет отличаться от идеальной синусоиды: последующие амплитуды ее уменьшаются по мере удаления от источника в результате того, что энергия звука распределяется на все бо́льшую поверхность и поглощается в самой среде.

Каждой точке, расположенной на кривой, соответствует своя фаза колебания. Однако можно указать некоторое число точек с равными фазами. Так, например, в точках $а_1$, $а_2$, $а_3$ имеет место максимум звукового давления. Одной и той же фазой характеризуются также колебания в точках $б_1$, $б_2$, $б_3$. Какое же расстояние разделяет точки с одинаковой фазой? Известно, что за один период источник звука посылает в среду одно сгущение и одно разрежение. Рассматривая рис. 7, видим, что отрезок $а_1а_2$ или $б_1б_2$ равен отрезку $в_1в_2$, т. е. отрезку, в котором укладывается одно разрежение и одно сгущение. Так как сгущения

и разрежения перемещаются со скоростью звука, то за время T, равное одному периоду, звуковые колебания распространяются на расстояние

$$\lambda = cT \quad \text{или} \quad \lambda = c/f. \qquad (12)$$

Расстояние λ между самыми близкими точками (например, B_1B_2), в которых колебания находятся в одной и той же фазе, называется длиной волны. Так, для частот звука от 50 до 10 000 Гц длины волны в воздухе изменяются от 6,8 м до 3,4 см.

Разность фаз между точками, разделенными расстоянием $n\lambda$, равна $2\pi n$, где n — целое число. Разность фаз φ между точками, находящимися на расстоянии l, может быть найдена из соотношения $\varphi/2\pi = l/\lambda$.
Отсюда

$$\varphi = 2\pi l/\lambda = kl, \qquad (13)$$

где $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c = \omega/c$.

Величина k в акустике обычно называется волновым числом. Через все точки, в которых колебания находятся в одной фазе, можно провести поверхность. Эта поверхность называется волновой или фронтом волны. В зависимости от формы, которую имеет поверхность фронта волны, различают волны сферические, плоские и т. д. Представим себе источник звука в виде пульсирующего шара, например резиновой оболочки, в которую попеременно нагнетается и из которой откачивается воздух. Такой источник звука посылает в среду сгущения и разрежения равномерно во все стороны, возбуждая сферические волны. Но на большом расстоянии от источника отдельные участки поверхности фронта сферической волны можно считать плоскими.

Практические источники звука обычно не дают ни той ни другой формы волны в чистом виде. При возбуждении звуковых волн энергия от источника поступает в среду. Благодаря этой энергии возникают колебательные движения частиц среды. Энергия этих колебаний может передаваться телам, помещенным в звуковое поле. Энергию звукового поля можно характеризовать количеством энергии, проходящей через единицу площади, расположенной в поле перпендикулярно направлению распространения звука за единицу времени (рис. 8). Эта величина называется интенсивностью звука и измеряется в ваттах на квадратный метр.

Для сферической волны по заданной интенсивности на заданном расстоянии от источника легко определить мощность источника. Действительно, на расстоянии r от источника соответствующая сферическая поверхность равна $4\pi r^2$. Если через каждый квадратный метр этой поверхности проходит мощность I, то мощность, проходящая через всю поверхность, составит $4\pi r^2 I$. Эту мощность P должен доставить источник.

Следовательно,

$$P = 4\pi r^2 I \quad \text{или} \quad I = P/(4\pi r^2). \qquad (14)$$

Интенсивность в сферической волне обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника. Но интенсивность связана со звуковым давлением в сферической волне соотношением $I = p^2/(\rho c)$, здесь ρc — волновое или удельное акустическое сопротивление среде, представляющее собой произведение плотности среды ρ на скорость звука c в ней. Для воздуха при 20° С и 760 мм рт. ст. $\rho c = 415$ кг/(с·м²).

Учитывая это, получаем: $p^2/(\rho c)=P/(4\pi r^2)$ или

$$p=\frac{1}{r}\sqrt{\frac{P\rho c}{4\pi}}, \qquad (15)$$

т. е. звуковое давление в сферической волне обратно пропорционально расстоянию от источника звука. Звуковые давления p_1 и p_2 в точках, расположенных от источника на расстояниях r_1 и r_2, связаны соотношением $p_1/p_2=r_2/r_1$.

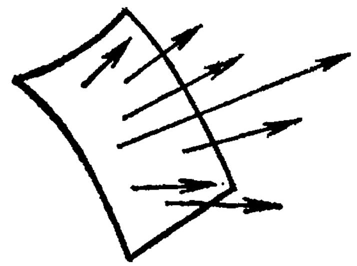


РИС. 8. Поток звуковой энергии через поверхность

Для плоской волны ни звуковое давление, ни интенсивность в какой-либо точке не зависят от положения точки в пространстве. Для плоской волны существуют следующие простые соотношения между звуковым давлением p, колебательной скоростью $\dot{x}$ и интенсивностью I:

$$\dot{x}=p/(\rho c), \quad I=\dot{x}p c, \qquad (16)$$

где p и $\dot{x}$ могут быть выражены либо в амплитудных, либо в действующих значениях. Связь между I и p такая же, как в сферической волне.

Эти соотношения аналогичны закону Ома и зависимости мощности от тока и напряжения в электрической цепи с активным сопротивлением.

На практике при звуковом давлении 1 Па колебательная скорость согласно (16) будет $\dot{x}=1/415=2{,}4\cdot10^{-3}$ м/с. Колебательное смещение на частотах 100, 1000 и 10 000 Гц согласно (2) соответственно равно: $x_{100}=2{,}4\cdot10^{-3}/(2\cdot\pi\cdot100)=3{,}8\cdot10^{-6}$ м, $x_{1000}=3{,}8\cdot10^{-7}$ м, $x_{10\,000}=3{,}8\cdot10^{-8}$ м. Амплитудные значения смещений будут в $\sqrt{2}$ больше. Ускорения на этих частотах согласно (2) $\ddot{x}_{100}=2\cdot\pi\cdot100\cdot2{,}4\cdot10^{-3}=1{,}5$ м/с^2, $\ddot{x}_{1000}=15$ м/с^2, $\ddot{x}=150$ м/с^2, т. е. будут довольны большими.

Так как значения акустических величин меняются в очень широких пределах, то их удобно выражать не в абсолютных значениях, а в логарифмических. К тому же громкость звука приближенно пропорциональна логарифму акустических величин (звукового давления, интенсивности и т. п.). Для вычисления таких логарифмических значений (уровней) пользуются следующими зависимостями.

Для звукового давления $N=20\lg\frac{p}{p_{00}}$.

Для интенсивности $M=10\lg\frac{I}{I_{00}}$.

Величины N и M измеряются в децибелах (дБ). В качестве p_{00} и I_{00} обычно принимаются значения соответственно $2\cdot10^{-5}$ Па и 10^{-12} Вт/м^2, уровень которых называется стандартным нулевым.

Положим, что следует определить уровень звукового давления 2 Па:

$N=20\lg\frac{2}{2\cdot10^{-5}}=20\lg\cdot10^5=20\cdot5=100$ дБ.

Уровень звукового давления в 1 Па будет равен 94 дБ.

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА ПОРШНЕВЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Для создания звукового поля источник звука — излучатель должен развивать некоторую мощность, которую он излучает. Очевидно, что для этого к источнику должна быть подведена мощность. Предположим, что источник звука представляет собой невесомый поршень, колеблющийся без трения в бесконечной стене. Если вокруг поршня создан вакуум, то ясно, что для приведения поршня в колебание достаточна бесконечно малая возбуждающая сила и соответственно такая же мощность. Однако картина резко изменится, если поршень окружает обычная среда. Оказывается, что при этом к поршню должна быть приложена определенная возбуждающая сила F, состоящая из активной и реактивной составляющих:

$$F = F_1 + jF_2 = \dot{x}(r_R + jx_R), \tag{17}$$

где $\dot{x}$ — колебательная скорость поршня.

Для того чтобы выяснить роли величин r_R и x_R, умножим обе части уравнения (17) на $\dot{x}$. Очевидно, что в результате умножения сил на скорость мы должны получить полную мощность в левой части и в правой части — активную и реактивную ее составляющие:

$$P_A = \dot{x}^2 r_R + j\dot{x}^2 x_R. \tag{18}$$

Полученное выражение аналогично выражению для полной электрической мощности в цепи с индуктивностью и активным сопротивлением: $P = I^2R + jI^2\omega L$.

В идеальном случае неограниченной среды активная мощность $\dot{x}^2 r_R$ идет на создание звукового поля в невозбужденных частях среды. Она теряется поршнем необратимо и должна непрерывно пополняться. Формально, поскольку процесс имеет необратимый характер, можно сказать, что мощность $\dot{x}^2 r_R$ затрачивается на каком-то сопротивлении r_R. Сопротивление r_R называют сопротивлением излучения. Таким образом, излученная источником звука мощность P может быть выражена как

$$P = \dot{x}^2 r_R. \tag{19}$$

Обычно среда, в которой происходит распространение звука, ограничена (например, поверхностями помещения, границами земной атмосферы). Казалось бы, что после возбуждения конечного объема среды источнику больше не на что затрачивать свою мощность, но необходимо помнить, что реальные среды обладают поглощением, т. е. при распространении звука часть его энергии превращается в тепло. Потери мощности имеют место также при отражении звука от ограничивающих объемов звукопоглощающих поверхностей. Поэтому при распространении звука в конечных объемах источник должен также доставлять мощность для покрытия этих потерь.

Что касается реактивной мощности $\dot{x}^2 x_R$, то дело обстоит так, как будто из-за наличия среды, окружающей поршень, поршень приобрел какую-то дополнительную массу и соответственно механическое реактивное (инерционное) сопротивление. Эта проявляющаяся при колебаниях масса, обусловленная наличием среды, носит название соколеблющейся или присоединенной массы.

Величины r_R и x_R не являются постоянными, а зависят от вида источника, его поверхности, от соотношения между размерами источника и длиной волны

излучаемого звука, а также от удельного акустического сопротивления среды.

Полное сопротивление излучения z_R может быть выражено как

$$z_R = r_R + j x_R = \rho c S \left(r'_R + j x'_R \right), \qquad (20)$$

где S — поверхность источника; ρc — волновое или удельное акустическое сопротивление среды; r'_R, x'_R — соответственно безразмерные удельные коэффициенты активного и реактивного сопротивлений, отнесенные к единице поверхности источника и к среде с единичным удельным акустическим сопротивлением.

Значения r'_R и x'_R могут быть вычислены с помощью довольно сложных математических выкладок. Результаты этих вычислений для поршня, колеблющегося в бесконечной стене (рис. 9,*а*), изображены графически на рис. 10,*а*. Здесь коэффициенты r'_R и x'_R выражены в зависимости от значения $ka = 2\pi a/\lambda = 2\pi f a/c = \omega a/c$, где a — радиус поршня.

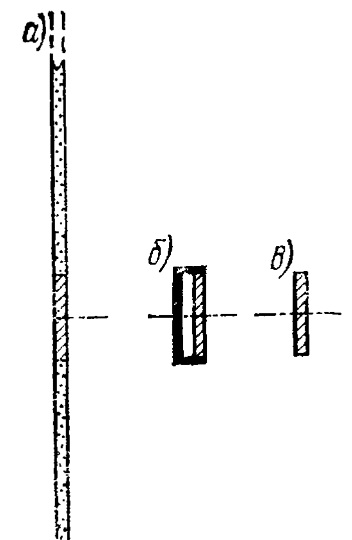


РИС. 9. Три типа поршневых излучателей:
а — круглый поршень в бесконечной стене; *б* — односторонний поршень без экрана; *в* — двусторонний поршень без экрана

При больших и малых значениях ka, т. е. соответственно на высоких и низких частотах, для коэффициентов r'_R и x'_R получаются следующие приближенные выражения:

при $ka \ll 1$

$$r'_R = \frac{(ka)^2}{2} = \frac{\omega^2 a^2}{2c^2}; \quad x'_R = \frac{8}{3} \frac{\omega a}{c}; \qquad (21)$$

при $ka \gg 1$ $r'_R = 1$; $x'_R = 0$.

Коэффициент x'_R определяет реактивную часть сопротивления излучения на низких частотах (при малых ka). Полное сопротивление этой части

$$x_R = \rho c S x'_R = \rho c S \frac{8}{3} \frac{\omega a}{c} = \frac{8}{3} \rho a^3 \omega.$$

Оно обусловлено некоторой соколеблющейся или присоединенной массой $8/3\rho a^3$. Поэтому величину x_R иногда называют инерционной частью сопротивления излучения.

При колебаниях поршня не в бесконечной стене возможны два случая: одна поверхность закрыта и не излучает (рис. 9,*б*), обе поверхности поршня открыты и излучают (рис. 9,*в*). Во втором случае при движении поршня, например, вправо, он создает сгущение правой стороной и разрежение — левой. Если взять какую-либо точку среды, находящуюся в плоскости поршня, то очевидно, что сгущения и разрежения доходят до нее одновременно и нейтрализуются. Следовательно в плоскости поршня звуковое давление равно нулю. Возьмем теперь точку O, лежащую где-либо вне плоскости поршня. Пути колебаний (сгущения и разрежения) до точки O от обеих сторон поршня различаются на какую-то ве-

личину Δl. Соответственно разность фаз φ колебаний, приходящих от обеих сторон поршня, равна уже не π, а $\varphi=\pi+2\pi\Delta l/\lambda$.

Член $2\pi\Delta l/\lambda$ должен быть достаточно большим, чтобы в точке O сгущения и разрежения не нейтрализовались. На низких частотах при заданной разности путей Δl значение $2\pi\Delta l/\lambda$ мало. Поэтому будет мало́ и развиваемое звуковое давление. Чтобы увеличить звуковое давление на низких частотах, необходимо поршень помещать в бесконечную стену (при этом $\Delta l=\infty$), а практически — в экран достаточно больших размеров.

Обычно вместо экрана применяют оформления в виде открытых с задней стороны ящиков, о чем подробнее будет сказано далее.

В поршне с закрытой задней поверхностью, изображенном на рис. 9,*б*, нейтрализация звукового давления, создаваемого передней поверхностью поршня, отсутствует. Однако на низких частотах звуковое давление, создаваемое таким поршнем, меньше, чем звуковое давление, создаваемое поршнем, колеблющимся в бесконечной стене. Это происходит за счет того, что в первом случае энергия излучается в окружающую среду в пределах телесного угла 4π, в то время как во втором она излучается только в пределах угла 2π. На высоких частотах разница будет небольшой из-за направленности излучения, о чем будет сказано далее. Следовательно, для излучения звуков низких частот важно помещать поршень в большой экран.

На рис. 10 кроме кривых r'_R и x'_R для поршня в бесконечном экране (*а*) приведены кривые r'_R и x'_R для поршня, закрытого с одной стороны (*б*), и кривые r'_R и x'_R для поршня, открытого с двух сторон (*в*) Для малых значений ka аналогично (21) значения r'_R соответственно равны:

$$\left.\begin{aligned} r'_R &= \frac{(ka)^2}{4} = \frac{\omega^2 a^2}{4c^2}, \\ r'_R &= \frac{8}{27}\frac{(ka)^4}{\pi^2} = \frac{8}{27}\frac{\omega^4 a^4}{\pi^2 c^4}. \end{aligned}\right\} \qquad (22)$$

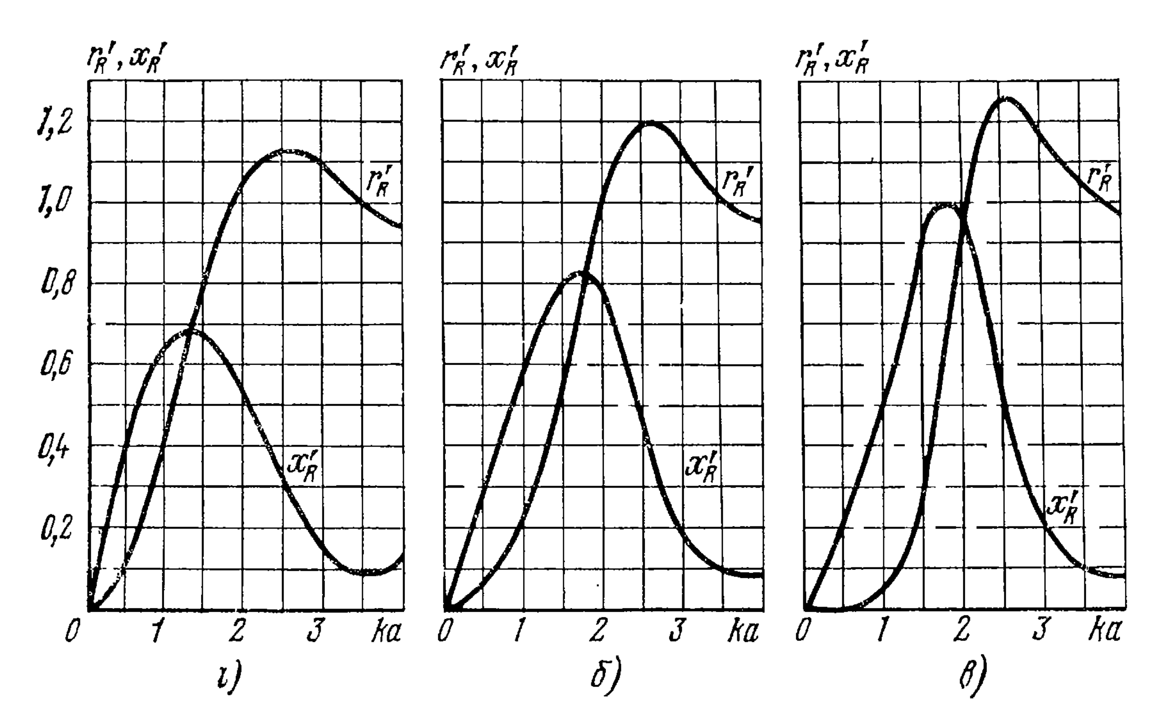


РИС. 10. Удельное сопротивление излучения различных видов излучателей

Соответственно значения x'_R будут:

$$x'_R = \frac{2}{\pi} ka = \frac{2\omega a}{\pi c}; \quad x'_R = \frac{4}{3\pi} ka = \frac{4\omega a}{3\pi c}.$$

Отсюда можно получить для величины соколеблющейся массы:

$$m_R = 2\rho a^3, \quad m_R = \frac{4}{3}\rho a^3. \tag{23}$$

Сопротивление излучения, будучи весьма малым для поршня, малого по сравнению с длиной волны и колеблющегося в бесконечном экране, становится еще меньше, если этот поршень колеблется без экрана или излучает только одной стороной. Таким образом, для излучения значительных мощностей поршень, малый по сравнению с длиной волны и имеющий малое сопротивление излучения, должен иметь весьма большие колебательные скорости [см. (19)].

Рассмотрим излучение поршня, находящегося в бесконечном экране (рис. 11). Положим, что мы находимся в точке, расположенной на прямой, идущей под углом α к оси поршня. Если эта точка расположена достаточно далеко от поршня, то можно считать, что все прямые, проведенные от различных точек поверхности поршня к ней, будут идти почти параллельно. Колебания же, распространяющиеся вдоль этих прямых, придут в эту точку с разными фазами. Отсюда колебания от крайних точек поршня диаметром d придут в рассматриваемую точку со сдвигом фазы

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\alpha = \frac{2\pi f d}{c} \sin\alpha.$$

При достаточно большом отношении d/λ колебания от разных точек диафрагмы будут приходить в фазе или с небольшой разностью фаз только в направлении оси или близком к ней (α мало). Поэтому в этих направлениях бу-

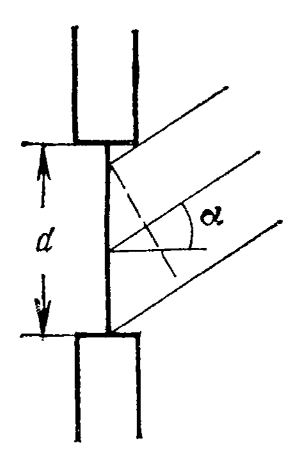


РИС. 11. Излучение поршня в разных направлениях относительно его оси

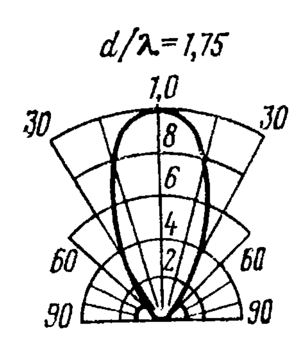


РИС. 12. Характеристика направленности при отношении $d/\lambda = 1{,}75$

дет иметь место заметное излучение. В других направлениях разности фаз колебаний могут быть такими, что они будут нейтрализовываться. Следовательно в этих направлениях излучение будет мало или будет совершенно отсутствовать. Таким образом, излучаемая звуковая энергия концентрируется в пределах более или менее узкого телесного угла.

Количественно направленность излучения определяется характеристиками направленности, обычно изображаемыми в полярных координатах. Характеристика направленности представляет собой графическое изображение относительной величины звукового давления R_α, развиваемого излучателем в данном направлении, по сравнению с давлением, развиваемым излучателем в направлении оси, в зависимости от угла, образованного осью излучателя и направлением излучения. Так, например, измерив на рис. 12 радиус-вектор, получим, что звуковое давление на любом расстоянии от излучателя под углом 15° к его оси составляет 0,8 значения звукового давления на том же расстоянии по оси излучателя. При излучении поршня без экрана характеристика направленности изображается косинусоидой (восьмеркой при построении в полярных координатах). На рис. 13

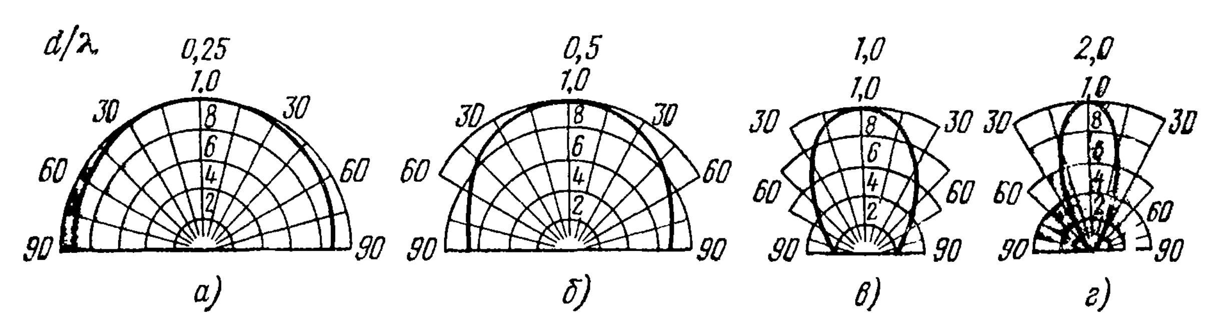


РИС. 13. Характеристики направленности излучения поршня в бесконечном экране при различных отношениях d/λ

изображены характеристики направленности излучения поршня, помещенного в бесконечный экран для различных значений отношения диаметра поршня к длине волны. Направленность излучателя может быть оценена и через так называемый коэффициент концентрации — отношение мощности, излученной направленным излучателем, развивающим звуковое давление, такое же, как и у ненаправленного излучателя на его оси к мощности, излученной последним. Коэффициент концентрации для ненаправленного излучателя равен единице, а для излучателя с восьмерочной (косинусоидальной) характеристикой направленности — трем. Направленность реальных излучателей в зависимости от частоты описывается более сложным образом и практически определяется при измерениях.

ИСКАЖЕНИЯ

Преобразование одного вида энергии в другой, в частности электрической в акустическую, практически не происходит без искажений. Основными видами искажений являются: амплитудно-частотные (АЧИ), фазово-частотные (ФЧИ), переходные (ПИ), которые могут быть определены через первые два, нелинейные (НИ).

Сущность АЧИ заключается в том, что преобразователь воспроизводит электрические сигналы разной частоты неодинаково. Например, при подведении напряжения 1 В на частоте 100 Гц к данному преобразователю он будет развивать на расстоянии 1 м по его оси звуковое давление 0,1 Па, а при подведении напряжения 1 В, но на частоте 1000 Гц он будет развивать звуковое дав-

ление 0,2 Па. Амплитудно-частотные искажения легко определяются по амплитудно-частотной (АЧХ) или чаще для краткости называемой частотной характеристике, где по оси абсцисс откладывается (как правило, в логарифмическом масштабе) частота, а по оси ординат также в логарифмическом масштабе (в децибелах) развиваемое звуковое давление в определенной точке пространства и при заданном режиме подведения напряжения к преобразователю, например при неизменном напряжении на всех частотах. Бланки АЧХ стандартизованы ГОСТ

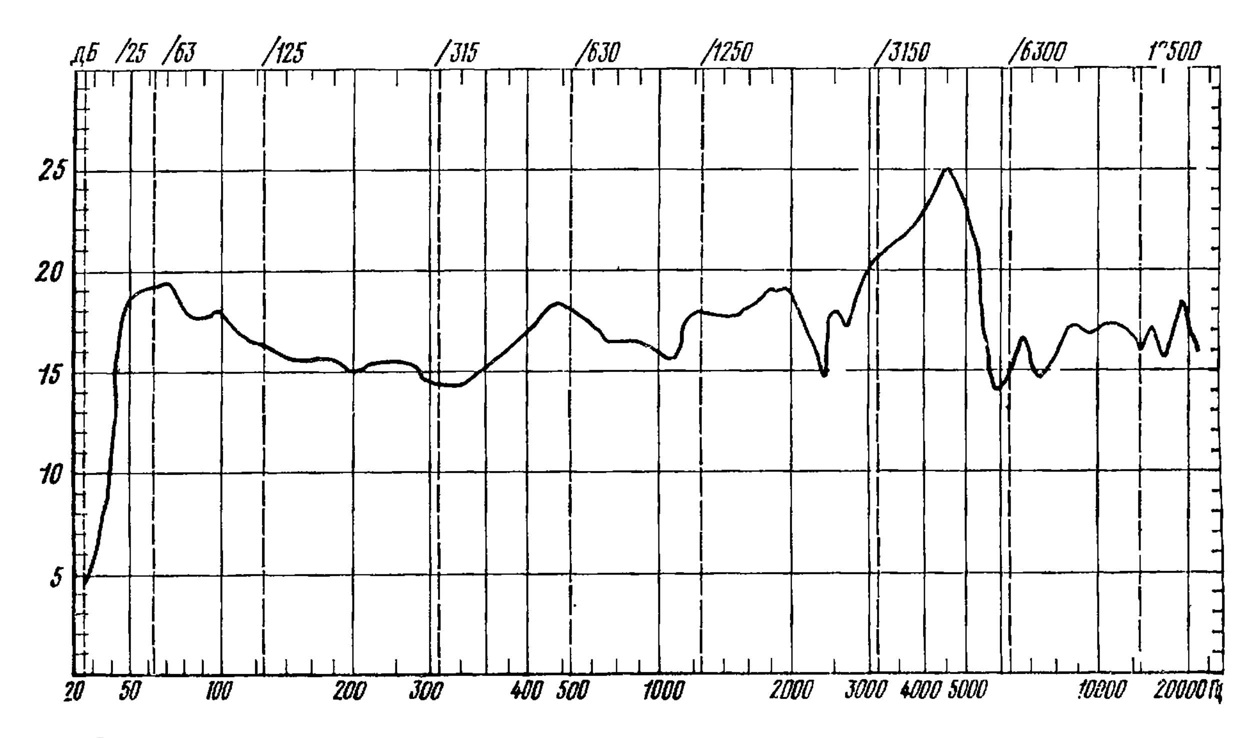


РИС. 14. Частотная характеристика акустической системы 35АС-1, изображенная на стандартном бланке АЧХ

16122—78 (рис. 14) и стандартом МЭК (рис. 15). Мерой АЧХ является ее неравномерность. Так, представленная на рис. 14 осевая АЧХ имеет неравномерность 15 дБ в диапазоне 40—20 000 Гц. Причинами АЧИ являются частотные зависимости сопротивления излучения и механических сопротивлений элементов преобразователя и их комбинаций, а также зависимость от частоты электрического входного сопротивления преобразователя.

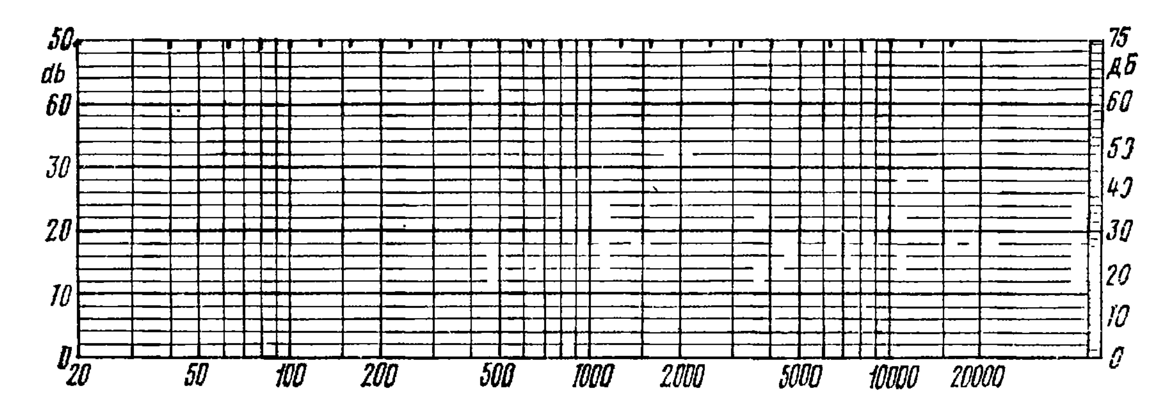


РИС. 15. Бланк АЧХ, стандартизованный МЭК

Сущность ФЧИ заключается в том, что сдвиг фазы между подводимым электрическим напряжением и развиваемым преобразователем звуковым давлением отличен от равномерно растущего с частотой сдвига фаз звукового давления между двумя точками поля, находящимися на разных расстояниях от естественного источника. Действительно, как следует из (13), сдвиг фазы пропорционален частоте и расстоянию от источника. Нарушение этой зависимости в преобразователях при излучении ими звука обусловливается, по существу, теми же причинами, которые имеют место при АЧИ.

Переходные искажения заключаются в том, что при подведении к преобразователю переменного напряжения излучаемое им звуковое давление не сразу достигает постоянного значения, а нарастает постепенно и не сразу спадает до нуля при выключении подводимого напряжения. Причины переходных искажений — инерция и упругость элементов преобразователя ПИ. Переходные искажения и ФЧИ отечественными стандартами не нормируются.

Нелинейные искажения проявляются в том, что при подведении к преобразователю напряжения одной или нескольких частот в излучаемом им звуке кроме составляющих этих частот появляются еще и другие. Эти частоты могут быть кратными подводимым частотам (гармоники), или в целое число раз меньше их (унтертоны или субгармоники), или являться суммой или разностью подводимых частот. В последнем случае говорят об интермодуляционных искажениях. Причинами НИ является то, что смещения, скорости, ускорения элементов преобразователя под воздействием приложенных к ним сил становятся непропорциональными приложенным силам, что вызывается их нелинейной зависимостью. По своей величине НИ оцениваются, во-первых, суммарным коэффициентом гармоник

$$k=\frac{\sqrt{p_2^2+p_3^2+\cdots}}{p_1}, \qquad (24)$$

где p_1 — звуковое давление на частоте подводимого напряжения; p_2, p_3 — звуковые давления в излученном звуке на частотах $2f_1$, $3f_1$ и т. д.

Кроме суммарного коэффициента гармоник часто НИ оцениваются характеристическим коэффициентом гармоник, который отличается от суммарного коэффициента гармоник тем, что в (24) значение p_1 заменяется $p_{ср}$ [см. (25)].

Другим видом оценки НИ являются коэффициенты интермодуляционных искажений, определяемые при подведении к преобразователю частот f_1 и f_2 как

$$k_{им2}=(p_{f2-f1}+p_{f2+f1})/p_{f2},$$

$$k_{им3}=(p_{f2-2f1}+p_{f2+2f1})/p_{f2},$$

где p_{f2} — звуковое давление на частоте f_2; p_{f2-f1}, p_{f2+f1}, p_{f2-2f1}, p_{f2+2f1} — соответственно звуковые давления на частотах, указанных в индексах.

Общий коэффициент интермодуляционных искажений

$$k_{им}=\sqrt{k_{им2}^2+k_{им3}^2}.$$

Следует заметить, что наибольшего значения НИ достигают при увеличении подводимой к преобразователю мощности до предельно допустимой.

Близким НИ видом искажений являются дребезжание и призвуки. И те и другие хорошо ощущаются при подведении к преобразователю синусоидального напряжения постепенно изменяющейся частоты.

Акустическая система (АС) любого типа характеризуется показателями, определяющими эффективность и качество ее работы. Важнейшие из них: чувствительность (отдача), диапазон воспроизводимых частот и неравномерность АЧХ в этом диапазоне, номинальная мощность и соответствующий ей коэффициент НИ, паспортная мощность, форма характеристики направленности, входное сопротивление.

Чувствительность АС — звуковое давление, развиваемое АС в некоторой определенной точке (обычно на расстоянии 1 м по ее оси) при подведении к ее зажимам напряжения в 1 В. Определяемая таким образом чувствительность удобна для суждения о поведении одной и той же АС на различных частотах или, иными словами, для построения АЧХ чувствительности АС.

Из определения чувствительности ясно, что частотные характеристики АС следует снимать в режиме постоянного напряжения, подводимого к их зажимам. Однако, если понятие чувствительности удобно для оценки указанной неравномерности, то оно совершенно неприемлемо при сравнении АС, имеющих разное электрическое сопротивление, так как при подведении равного напряжения разные АС потребляют разную мощность.

Более удобная характеристика — *стандартное звуковое давление* (СЗД), под которым подразумевается звуковое давление, развиваемое АС при подведении к ней электрической мощности 0,1 Вт в точке на расстоянии 1 м и расположенной по ее оси. Подводимое при этом к АС напряжение будет $U=\sqrt{0,1R}$, где R — номинальное электрическое сопротивление. При такой характеристике разные АС сравниваются при одном и том же значении потребляемой мощности. Международной электротехнической комиссией (МЭК) стандартизовано понятие *характеристической чувствительности* (ХЧ), которая отличается от СЗД лишь тем, что к АС подводится электрическая мощность не 0,1 Вт, а 1 Вт и соответственно напряжение $U=\sqrt{R}$. Отсюда ХЧ больше СЗД в $\sqrt{10}=3,16$ раза, поскольку звуковое давление пропорционально корню квадратному из мощности.

Помимо этих величин за рубежом часто применяют так называемый «уровень характеристической чувствительности», который представляет собой уровень ХЧ относительно стандартного нулевого уровня звукового давления $2\cdot10^{-5}$ Па. Пусть, например, СЗД данной АС составляет 0,2 Па. Тогда его ХЧ будет $0,2\times3,16=$ $=0,632$ Па, а уровень ХЧ $20\lg\frac{0,632}{2\cdot10^{-5}}=20\lg0,316\cdot10^5=$ $=20\lg3,16\cdot10^4=20\cdot4,5=90$ дБ.

Как уже говорилось, для построения частотной характеристики откладывают либо значение СЗД, либо ЧХ в логарифмическом масштабе. По этой характеристике легко определить неравномерность характеристики в заданном (номинальном) диапазо-

не частот. Численно она равна разности уровней, соответствующих максимальной и минимальной чувствительности. Так, неравномерность частотной характеристики, изображенной на рис. 14, составляет 11 дБ. По частотной характеристике определяют также среднее СЗД в номинальном диапазоне

$$p_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}}{n}, \tag{25}$$

где p_1, p_2, ..., p_n — СЗД на частотах f_1, f_2, ..., f_n, входящих в диапазон воспроизводимых частот; n — число частот, которые выбираются равномерно в логарифмическом масштабе.

Значение НИ тесно связано с номинальной мощностью, под которой понимается такое значение подводимой мощности, при котором НИ не превышают заданного значения.

Таблица 1

Параметр	Норма по группам сложности			
	0	1	2	3
1. Диапазон воспроизводимых частот, Гц, не уже	31,5—20000 (25—25000)	50—16000 (40—16000)	80—12500 (63—12500)	100—8000
2. Отклонение частотных характеристик звукового давления, усредненных в октавных полосах, между любыми двумя акустическими системами конкретного типа, дБ, не более	3 (2)	3	(4)	—
3. Среднее звуковое давление при номинальной электрической мощности, ПА (дБ), не менее в диапазоне частот:				
100—8000 Гц	1 (94)	1 (94)	0,8 (92)	—
200—4000 Гц	—	—	—	0,63 (90)
4. Суммарный характеристический коэффициент гармоник при электрической мощности, соответствующей среднему звуковому давлению на 4 дБ ниже указанного в п. 3 таблицы значения, %, не более в диапазонах частот:				
250—1000 Гц	2	2	4 (3)	5 (4)
1000—2000 Гц	2 (1,5)	2 (1,5)	3 (2,5)	4 (3)
2000—6300 Гц	1	1	2	3
5. Электрическое сопротивление:				
номинальное значение, Ом	4 или 8			
допускаемое отклонение минимального значения модуля полного электрического сопротивления от номинального значения, %, не более	20			
6. Масса, кг, не более	80 (63)	25 (20)	16 (12,5)	6,3 (5)

Требования к направленности обычно заключаются в том, что частотные характеристики, снятые под определенным углом к оси АС и совмещенные с частотной характеристикой, снятой на оси, не отклонялись бы от последней во всем диапазоне более, чем на заданное число децибел.

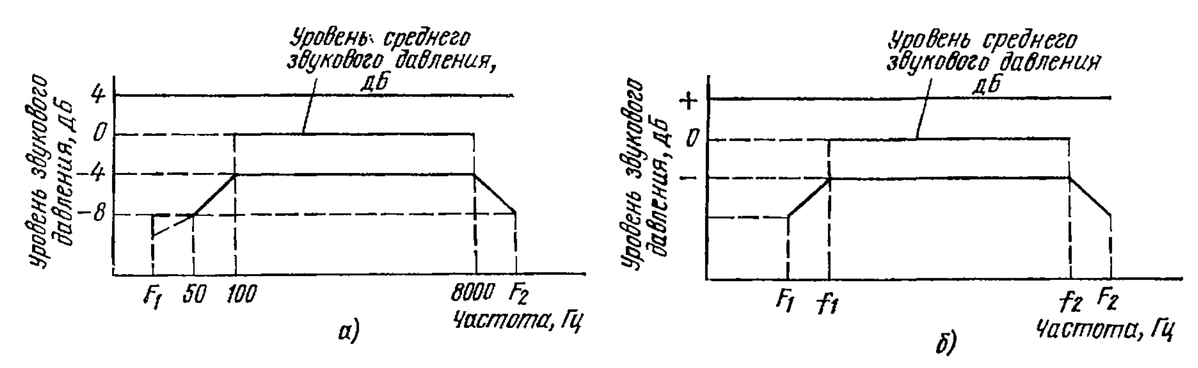


РИС. 16. Поля допусков частотной характеристики звукового давления АС: а — высшей (0) группы сложности; б — 1, 2 и 3 групп сложности

Входное электрическое сопротивление АС также нормируется.

Нормы на все указанные параметры АС в настоящее время стандартизованы отечественными ГОСТ 23262—83 и стандартом МЭК. Эти нормы приведены в табл. 1. К таблице могут быть сделаны следующие замечания. Частотные характеристики АС должны укладываться в поле допусков, изображенное на рис. 16,*а* и 16,*б*. Рисунок 16,*а* справедлив для АС высшей (0) группы сложности. Для этих АС допустимое отклонение частотной характеристики от уровня СЗД не должно превышать ±4 дБ, на частотах 50 Гц и F_2 допускается спад частотной характеристики от уровня СЗД до 8 дБ. В диапазоне частот F_1 — 50 Гц спад частотной характеристики устанавливается в ТУ на АС.

Рисунок 16,*б* справедлив для АС 1, 2 и 3 групп сложности. Допустимое отклонение частотной характеристики от уровня среднего СЗД (N) не должно превышать ±4 дБ для 1 группы сложности и ±6 дБ для 2 и 3 групп сложности. Частота f_1 выбирается равной 100 Гц для 1 и 2 групп сложности и 200 Гц — для 3 группы. Частота f_2 выбирается равной 8000 Гц для 1 и 2 групп сложности и 4000 Гц — для 3 группы (F_1 и F_2 — граничные частоты диапазона воспроизводимых частот, на которых уровень звукового давления АС на 8 дБ ниже уровня СЗД в диапазоне f_1—f_2).

Номинальную электрическую мощность АС следует выбирать из ряда: 3, 6, 10, 15, 25, 35, 50, 75, 100 Вт. Частотные характеристики АС, снятые под углами ± (20°—30°) к оси в горизонтальной плоскости и ± (5°—10°) в вертикальной, не должны отличаться от частотной характеристики, снятой на оси больше, чем на ±4 дБ.

Требования МЭК к системам высокой верности (*Hi—Fi*) в основном совпадают с требованиями к группе 1, перечисленными в табл. 1. Требованиям отечественного стандарта должны удов-

летворять АС всех видов, основными из которых являются открытые, закрытые, с фазоинвертором и с пассивным излучателем Однако для систем высокой верности применяются только последние три вида. Их распространение (в процентах от числа типов) в разных странах иллюстрирует табл. 2.

Таблица 2

Страна	Закрытые системы, %	АС с фазоинвертором, %	АС с пассивным излучателем, %	Другие системы, %
США	42,7	32,4	8,6	16,3
Страны Западной Европы	60,8	31,7	6,5	1,0
Япония	27,9	62,3	9,8	—

Заметим, что воспроизведение столь широких частотных диапазонов, какие указаны в табл. 1, с помощью одного преобразователя (головки) затруднительно. Поэтому большая часть АС имеет головки, предназначенные для воспроизведения различных участков диапазона: низкочастотного (НЧ), среднечастотного (СЧ), высокочастотного (ВЧ).

ГОЛОВКИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Непременная часть любой АС — возбуждающая ее одна или несколько головок громкоговорителей. Головки преобразуют подводимую к ним электрическую энергию сигнала — музыку и речь — в энергию колебаний их подвижных систем и далее в излучаемый звук. Головки громкоговорителей могут различаться по способу преобразования энергии и по способу их связи с окружающей средой, которую они возбуждают.

В настоящее время известны следующие способы преобразования энергии: электродинамический, электромагнитный, электростатический, пьезоэлектрический.

Наиболее распространен электродинамический способ. Он используется в таких конструктивных разновидностях: а) диффузорный, б) с куполообразной диафрагмой, в) изодинамический, г) ленточный. Существенно реже применяют электростатический и пьезоэлектрический способы. Только отдельные образцы немногих зарубежных фирм используют ионный способ. Устарел и практически не используется электромагнитный способ.

По способу связи со средой применяются конструкции: прямого излучения, где подвижный орган (диафрагма, диффузор) излучает непосредственно в среду, и рупорные, где диафрагма излучает в среду через рупор.

Наибольшее применение в бытовых АС имеют головки прямого излучения. Рупорные же головки используются значительно реже, главным образом для воспроизведения высокочастотной части звукового диапазона (высокочастотные головки). Пример наиболее распространенной конструкции электродинамической головки приведен на рис. 17.

В кольцевом воздушном зазоре магнитной цепи, состоящей и постоянного магнита *1* и магнитопровода *2—4*, в радиальном направлении проходит постоянный магнитный поток. В этом зазоре помещается звуковая катушка *5*, к которой подводится переменное напряжение звукового сигнала. Ток, проходя через катушку, взаимодействует с постоянным магнитным потоком, благодаря чему возникает сила, приводящая в колебание катушку и скрепленную с ней диафрагму (диффузор) *6*. Диффузор, обычно бумажный, представляет собой конус, имеющий в основании окружность или эллипс и прямую или криволинейную образующую. По внешнему краю диффузор имеет гофрированный подвес *9*. Назначение подвеса — создать диффузору возможность колебаться поршнеобразно в более широком диапазоне частот. У вершины диффузор, а вместе с ним звуковая катушка удерживаются в коаксиальном относительно зазора магнитной цепи положении с помощью центрирующей шайбы *8*. Эта шайба большей частью также гофрированная, охватывает по внутреннему контуру вершину диффузора и звуковую катушку, а по внешнему — крепится к специальному кольцу. У вершины диффузора к нему прикреплен пылезащитный колпачок.

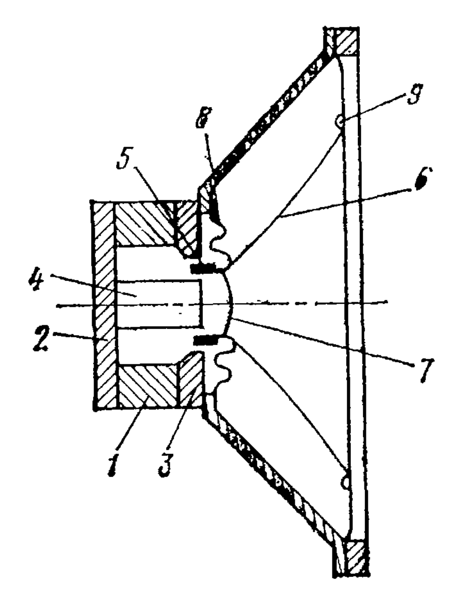


РИС. 17. Электродинамическая головка прямого излучения

Магниты изготавливают из материалов с большой магнитной энергией. В СССР в настоящее время в основном используются четыре вида материалов. Это прессованный феррит бария марки 2БА для изготовления прессованных кольцевых магнитов. В последнее время начали выпускать, хотя и в незначительном объеме, прессованные магниты из материала 3,2БА. Максимальная удельная магнитная энергия 3,2БА в 1,6 раза больше, чем у 2БА, что дает возможность при равном объеме магнита получать индукцию в зазоре примерно в 1,25 раза бо́льшую или же иметь магнит в 1,6 раза меньшего объема.

Для литых магнитов применяют сплавы ЮНДК-24 и ЮНДК-25БА. Из первого, имеющего максимальную удельную магнитную энергию, в 2 раза большую, чем у 2БА, отливают магниты либо в форме колец (полых цилиндров), либо в форме цилиндров, используемых конструктивно как керны. Иногда эти

керны отливают с суженной в форме груши верхней частью для уменьшения утечки магнитного потока. Магниты льют (только керновые) также из сплава ЮНДК-25БА с максимальной удельной магнитной энергией, в 3 раза большей, чем у 2БА. Экономически выгоднее прессованные магниты, несмотря на то что они имеют меньшую удельную магнитную энергию. Кроме того, в них не входят дефицитные материалы. Но поскольку они составляют внешнюю часть магнитной системы, то вокруг громкоговорителей, частью которых они являются, наблюдается заметный поток рассеяния, что нежелательно, если не предусматривать специальных мер при применении этих громкоговорителей в телевизорах, где этот поток утечки искажает «картину», в радиоприемниках с магнитной антенной, где он изменяет настройку, и в магнитофонах, где при близком расположении от магнитной ленты он «зашумливает» фонограмму. Эти соображения следует иметь в виду при выборе громкоговорителя для того или иного применения. Детали магнитопровода (фланцы, керн, если он не является магнитом, полюсный наконечник) делают из магнитомягкого материала для уменьшения сопротивления магнитному потоку, например из малоуглеродистых сталей СТ-3 и СТ-10.

Звуковые катушки изготавливают из медного провода марки ПЭЛ. Витки катушки скрепляют между собой и каркасом (обычно из кабельной бумаги) клеем. Редко для звуковых катушек высокочастотных головок для уменьшения массы применяют алюминиевый провод.

Диффузор — важнейшая часть головки. Его форма и материал оказывают важное влияние на характеристики головки. В настоящее время наиболее часто для его изготовления используют сульфатную или сульфитную целлюлозу, в некоторых случаях с определенными добавками. Диффузоры изготавливают методом литья (осаждения) водной суспензии размолотых волокон целлюлозы на сетку, имеющую форму диффузора. После просушивания диффузоры подвергают уплотнению путем их прессования. В более дешевых головках вместе с диффузором отливают и подвес, конструктивно являющийся его частью, но имеющий меньшую толщину. В более дорогих головках подвес изготавливают из специальных сортов резины или латекса.

Конструкции различных диффузорных электродинамических головок имеют лишь некоторые конструктивные различия.

Конструкции рупорных головок показаны на рис. 18, а конструкция головки с куполообразной диафрагмой — на рис. 19.

Головка с куполообразной диафрагмой отличается от диффузорной тем, что диафрагма ее имеет форму купола, что делает ее более жесткой и более приспособленной для излучения высших частот диапазона. Головки с куполообразной диафрагмой имеют более широкую диаграмму направленности, что очень важно для среднечастотных и высокочастотных головок.

Пример конструкции ленточной головки приведен на рис. 20. Здесь между полюсными наконечниками *1—1* магнитной системы

укреплена тонкая, толщиной в несколько микрометров, гофрированная (обычно алюминиевая) лента 2, к которой подводится через трансформатор напряжение звукового сигнала. Благодаря взаимодействию тока в ленте и магнитного потока между полюсными наконечниками лента колеблется. Она совмещает в себе функции

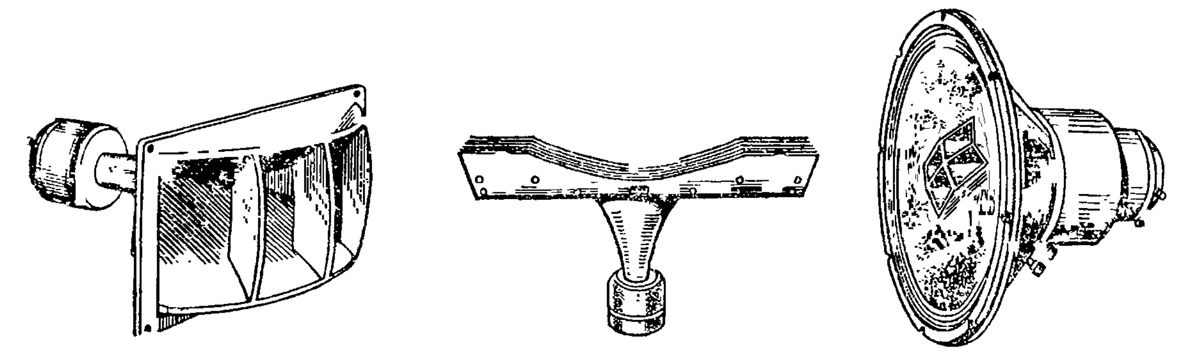


РИС. 18. Внешний вид рупорных головок:
а — секционированный рупор; *б* — рупор с акустической линзой; *в* — комбинированная система — рупорная головка совмещена с низкочастотной электродинамической головкой прямого излучения

диафрагмы и проводника с током. Ленточные головки также применяются в основном как высокочастотные.

Пример конструкции изодинамической головки приведен на рис. 21. Она состоит из магнитной системы и диафрагмы. Оригинальная магнитная система, в свою очередь, состоит из двух дискообразных магнитов, например из феррита бария, намагниченных

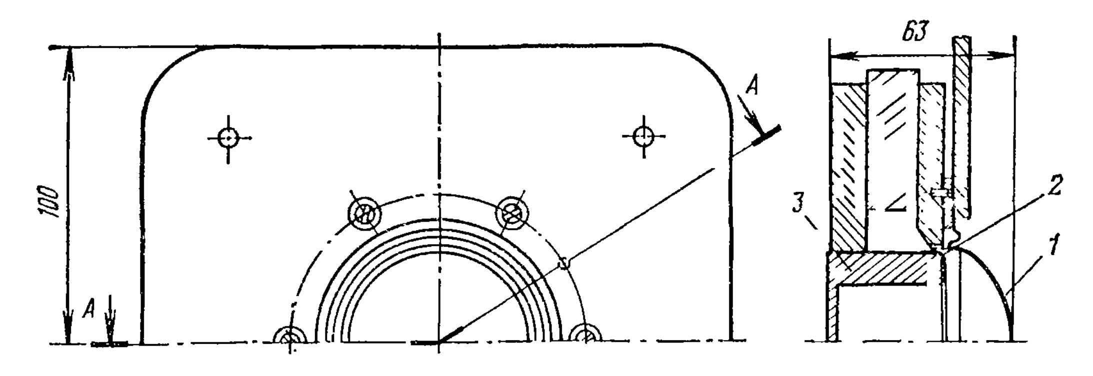


РИС. 19. Устройство головки с куполообразной диафрагмой:
1 — диафрагма; *2* — звуковая катушка; *3* — магнитная цепь

таким образом, что каждый из них имеет три пары полюсов. Скажем, центральная часть, ограниченная окружностью, имеет полярность *N*, следующая кольцевая *S* и наружная кольцевая *N*. Таким образом, по поверхности магнита проходят два радиальных магнитных потока. Так же намагничен второй магнит. Магниты во всей своей плоскости перфорированы, для того чтобы обеспечить проход звука через отверстия при колебаниях диафрагмы из синтетической пленки, натянутой между магнитами на равных расстояниях от поверхности каждого из них. На пленку нанесен проводник в виде спирали. В том месте, где встречаются проти-

воположно направленные потоки (окружность, проходящая через точку *A* на рис. 21), витки спирали начинают идти в обратном направлении. Таким образом, сохраняется одно и то же взаиморасположение магнитного поля и электрического тока. Благодаря тому, что диафрагма такой головки возбуждается по всей поверхности, она очень эффективна, имеет весьма равномерную частотную характеристику. Однако конструкция изодинамических головок довольно сложна, и они редко применяются в практических конструкциях бытовых АС.

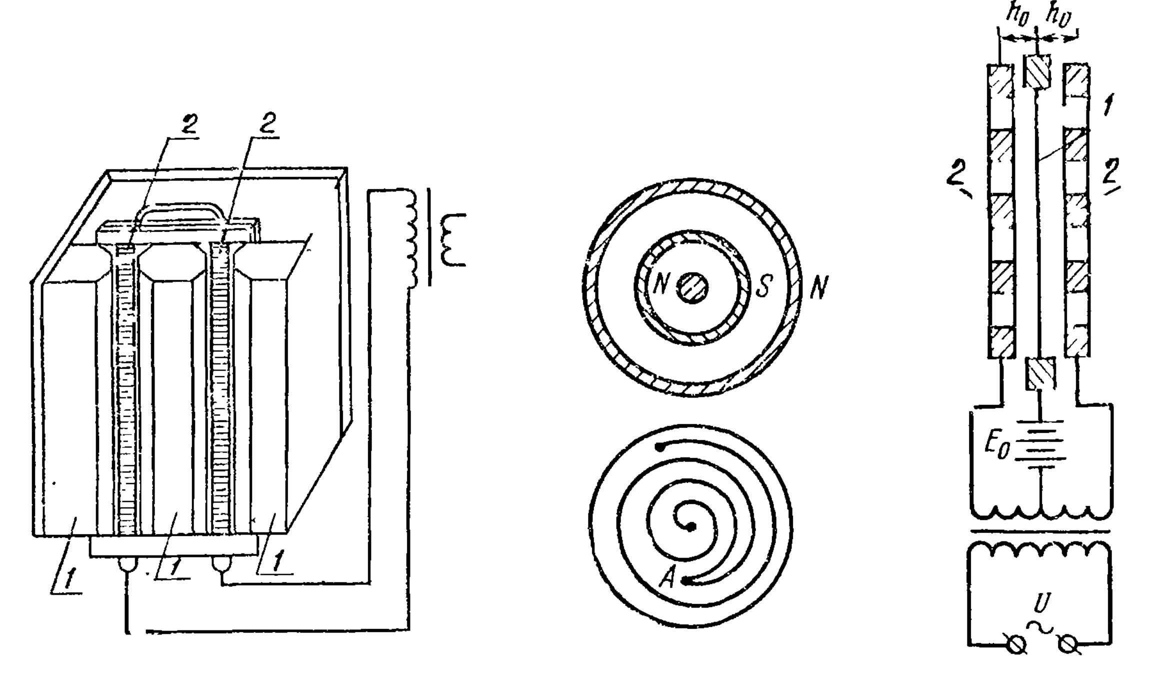


РИС. 20. Устройство ленточной головки

РИС. 21. Устройство изодинамической головки

РИС. 22. Устройство электростатической головки

Принцип действия электростатических головок (рис. 22) заключается в том, что между двумя перфорированными пластинками *2* — неподвижными электродами, располагается подвижный электрод *1* обычно в виде металлизированной пленки. На подвижный электрод подаются переменное напряжение от источника токов звуковой частоты и постоянное поляризующее напряжение, в несколько раз большее переменного, что необходимо как для повышения чувствительности, так и для уменьшения специфических для электростатического способа преобразования нелинейных искажений по второй гармонике. В зависимости от мгновенной полярности по переменному напряжению подвижный электрод притягивается то к одному, то к другому неподвижному электроду. Получаемые таким образом колебания через перфорации неподвижных электродов возбуждают окружающую воздушную среду. Электростатические головки большей частью выполняют как системы, непосредственно излучающие в среду. Значительно реже применяют электростатические рупорные головки. Для излучения

достаточной акустической мощности необходимо, чтобы амплитуда колебаний подвижного электрода, особенно на низких частотах, была достаточно большой. Но для этого необходимо, чтобы был достаточно велик зазор между подвижным и неподвижным электродами. Отсюда следует, что электростатическая головка малых размеров годится только для воспроизведения высоких частот. Для перекрытия широкого диапазона частот целесообразно применять многополосные головки, т. е. совокупность головок, каждая из которых воспроизводит только часть диапазона частот. Поэтому для воспроизведения низких частот и всего диапазона в целом электростатические головки должны иметь большие площади, хотя толщина конструкции может быть сравнительно небольшой.

Преимущества электростатических преобразователей состоят в том, что они возбуждаются по всей поверхности подвижного электрода, благодаря чему все его точки колеблются синфазно, и он излучает всей поверхностью, что особенно важно при излучении высоких частот. Поэтому частотная характеристика электростатических преобразователей является весьма протяженной в сторону высоких частот по сравнению с преобразователями, построенными на других видах преобразования. Недостатками электростатических головок являются прежде всего, как уже упоминалось, специфические для них виды нелинейных искажений во второй гармонике, возникающие из-за того, что сила электростатического притяжения пропорциональна не приложенному к электродам напряжению, а его квадрату. Эти искажения значительно уменьшаются при применении напряжения поляризации и использовании изображенной выше дифференциальной конструкции. Но дифференциальная конструкция дает необходимый эффект только при высокой степени симметрии расположения подвижного электрода между неподвижными. Должна соблюдаться и электрическая симметрия, т. е. равенство подаваемых на оба неподвижных электрода напряжений.

Не всегда удобно и то, что электростатические головки для воспроизведения широкого частотного диапазона должны иметь большую излучающую поверхность. Это, кроме конструктивных неудобств, приводит к тому, что характеристика направленности такой головки зависит от частоты, сильно обостряясь с ее повышением. Это можно устранить, составляя головку из отдельных сравнительно узких панелей, располагаемых в горизонтальной плоскости (например, по дуге окружности). Существенный недостаток электростатических головок состоит также в том, что они являются для питающих их усилителей емкостной нагрузкой, сопротивление которой $1/(\omega C)$ падает с частотой, и требуют дополнительного источника высокого напряжения. Все это усложняет построение усилителя.

Поэтому электростатические головки в настоящее время распространены сравнительно мало, хотя их выпуск в зарубежных странах и растет. Наибольшее распространение электростатиче-

ские головки получили там в качестве высокочастотных элементов многополосных систем.

Появившиеся в последние годы (электростатические) электретные преобразователи имеют то преимущество, что здесь нет необходимости в источнике поляризующего напряжения, поскольку электроды несут на себе постоянный и довольно стабильный во времени электрический заряд.

Одним из других способов преобразования, применяемых в головках, является пьезоэлектрический, ставший более используемым благодаря появлению эффективных пьезоэлектрических пленок. Здесь также не требуется напряжения поляризации. В остальном же и электретные, и пьезоэлектрические преобразователи обладают в принципе теми же свойствами, что и электростатические. Следует упомянуть и о том, что бытовые электростатические, электретные и пьезоэлектрические АС являются двусторонними излучателями, т. е. имеют восьмерочную характеристику направленности. Поэтому их рекомендуется не располагать у стен помещения, а устанавливать где-то посередине его.

Рассмотрев принципы устройства головок разных видов преобразования энергии, остановимся несколько подробнее на наиболее распространенном виде — электродинамическом. Подвижная система этого преобразователя, в особенности на низших частотах, может считаться простой колебательной системой, имеющей три основных параметра — массу m_0, гибкость c_0 и активное механическое сопротивление r_0. Рассчитаем СЗД такой головки диаметром d со звуковой катушкой с длиной проводника l, находящейся в воздушном зазоре, где имеет место индукция B. Так как СЗД определяется для мощности 0,1 Вт, то соответствующее этой мощности электрическое напряжение, исходя из соотношения $0{,}1 = U^2/R$, будет $U = \sqrt{0{,}1R}$. Используя это соотношение и применяя выражения (15), (19), (4) и (6) и полагая $r = 1$ м, получаем

$$p_{ст} = \frac{\sqrt{\dfrac{\rho c r_R B^2 l^2}{40\pi R} K}}{z_м + B^2 l^2/R}.$$

Здесь K — коэффициент концентрации введен под радикал, чтобы учесть, что излучение может быть направленным. Далее можно написать

$$z_м + \frac{B^2 l^2}{R} = r_0 + \frac{B^2 l^2}{R} + j(\omega m_0 - s_0/\omega) = \omega_0 m_0 \left[\frac{r_0 + B^2 l^2/R}{\omega_0 m_0} + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right].$$

Величину $\dfrac{\omega_0 m_0}{r_0 + B^2 l^2/R} = \dfrac{s_0}{\omega_0 (r_0 + B^2 l^2/R)} = Q$ называют добротностью. Физически эта величина характеризует, насколько быстро затуха-

ют колебания в возбужденной колебательной системе. Используя это обозначение и беря модуль выражения $z_м+B^2l^2/R$, получаем

$$|p_{ст}|=\sqrt{\frac{pcr_R\,B^2\,l^2\,K}{40\,\pi\,R\,\omega_0^2\,m_0^2\left[\frac{1}{Q^2}+\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right]}}\,.$$

Значения r_R и K зависят от того, излучает ли головка в обе стороны или односторонне.

Если головка излучает в обе стороны, используя (20) и (22) и учитывая, что при этом $K=3$, получаем после несложных преобразований

$$p_{ст}=\frac{1}{\pi\sqrt{90}}\,\frac{\rho}{c}\,\frac{a^3}{m_0}\,\omega_0\,\frac{B^2\,l^2}{R}\,\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\frac{1}{Q^2}+\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}\,.$$

Соответственно для одностороннего (ненаправленного) излучения ($K=1$), используя также (20) и (22), получаем

$$p_{ст}=\frac{\rho\,a^2}{\sqrt{40}}\,\frac{\omega/\omega_0}{m_0}\,\frac{\sqrt{\frac{B^2\,l^2}{R}}}{\sqrt{\frac{1}{Q^2}+\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}\,. \qquad (26)$$

Анализ этих формул приводит к следующим выводам: форма частотной характеристики двустороннего излучателя зависит от добротности. Если $Q<\sqrt{2+\sqrt{3}}=1{,}93$, то частотная характеристика имеет вид, показанный на рис. 23 (кривая 1), т. е. монотонно возрастает теоретически до бесконечности. Однако практически такой ход будет иметь место только до верхней границы $f_{гр}$ поршневого диапазона, которая определяется соотношением

$$f_{гр}=1{,}4\,c/(\pi\,d) \qquad (27)$$

или, учитывая, что скорость звука в нормальных условиях 343 м/с: $f_{гр}=154/d$ (где d, м). Для эллиптических головок вместо диаметра d надо подставлять $\sqrt{d_1d_2}$, где d_1 и d_2 соответственно значения большой и малой осей эллипса.

Иная картина будет, если $Q>1{,}93$. Ход частотной характеристики в этом случае изображен кривой *2* на рис. 23. Как видно, здесь будет иметь место пик и провал. Разность из уровней будет тем больше, чем больше добротность. Эта зависимость представлена графически кривой N на рис. 24. Там же изображено отношение ω_1/ω_0 частоты пика ω_1 к резонансной частоте ω_0 в зависимости от добротности и отношение частоты провала ω_2 к резонансной частоте ω_0.

При ненаправленном излучении $\omega>\omega_0$ (26), т. е. когда колебательная система управляется массой, стандартное звуковое дав-

ление становится частотно-независимым. Однако ход частотной характеристики стандартного звукового давления в околорезонансной области сильно зависит от добротности (рис. 25). При $Q=1$ эта характеристика имеет наиболее равномерный ход. При $Q>1$ на ней появляется пик тем более высокий, чем больше доброт-

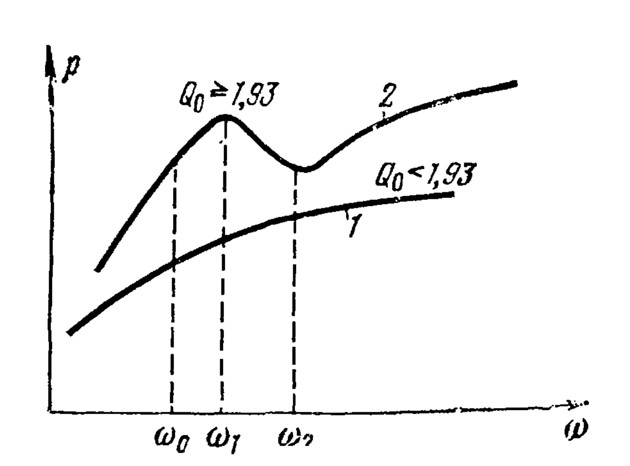


РИС. 23. Частотные характеристики электродинамической головки с двусторонним излучением

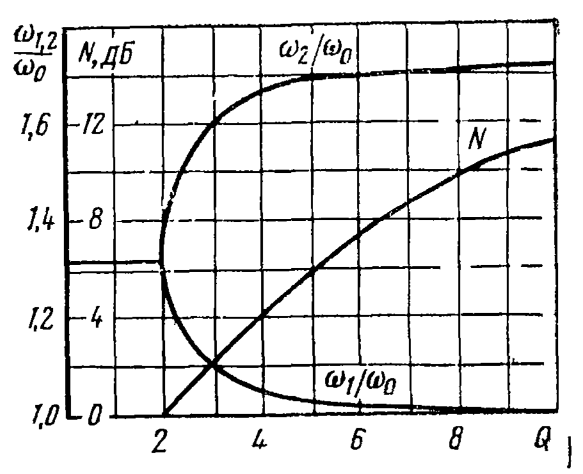


РИС. 24. Разности уровней пика и провала и отношение их частот к резонансной частоте в зависимости от добротности

ность. Чаще всего в литературе рекомендуется $Q=0{,}707$, на резонансной частоте при этом имеет место спад 3 дБ, при $Q=0{,}5$ спад равен 6 дБ. При $Q\leqslant 0{,}5$ колебательная система становится апериодической, т. е. неспособной к свободным колебаниям при ее возбуждении.

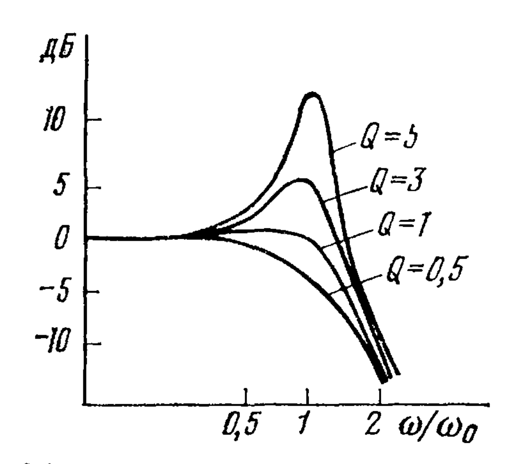


РИС. 25. Частотные характеристики закрытой АС с различной добротностью

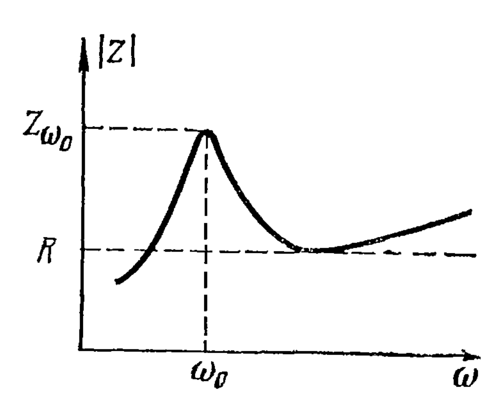


РИС. 26. Частотные характеристики модуля полного электрического сопротивления электродинамической головки

Кроме величины СЗД и частотной характеристики электродинамической головки существенный интерес представляет также ее электрическое сопротивление и его зависимость от частоты — *частотная характеристика модуля полного электрического сопротив-*

ления головки, часто называемого *Z-характеристикой.* Обычны вид такой характеристики представлен на рис. 26. Ее ход объясняется следующим образом. На самых низших частотах полное электрическое сопротивление почти не отличается от сопротивления звуковой катушки постоянному току. По мере повышения частоты и ее приближения к резонансной частоте полное сопротивление увеличивается за счет прибавления вносимого сопротивления [см. (17)] и достигает максимума на частоте резонанса, поскольку на ней механическое сопротивление минимально.

Действительно,

$$Z = R + \frac{B^2 l^2}{r_0 + j(\omega m_0 - s_0/\omega)} = R\left[1 + \frac{B^2 l^2/R}{\omega_0 m_0\left[\frac{1}{Q_м} + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right]}\right].$$

Величина $\frac{\omega_0 m_0}{B^2 l^2/R}$ носит название электрической добротности $Q_э$, величина $\omega_0 m_0/r_0$ — механической добротности $Q_м$. Эти величин связаны с полной добротностью Q подвижной системы соотношением: $1/Q = 1/Q_э + 1/Q_м$.

Используя эти соотношения, имеем

$$Z = R\left\{1 + \frac{1}{Q_э\left[\frac{1}{Q_м} + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right]}\right\}.$$

Модуль этого выражения

$$|Z| = \frac{R}{Q_э}\sqrt{\frac{\left(1 + \frac{Q_э}{Q_м}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}{\frac{1}{Q_м^2} + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}.$$

Обычно $Q_м$ довольно велико, а $Q_э$ — мало. Отсюда на резонансе, где $\omega = \omega_0$, величина $Z\omega_0 \gg R$. Далее полное сопротивление спадает почти до сопротивления постоянному току. По мере дальнейшего повышения частоты полное электрическое сопротивление растет за счет того, что начинает проявляться индуктивное сопротивление звуковой катушки. Как будет видно дальше, характеристика электрического сопротивления оказывается полезной для анализа работы головки.

ОТКРЫТОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ

Открытым акустическим оформлением головки называется такое ее оформление, при котором задняя сторона звукоизлучающей поверхности диффузора головки не изолирована акустически от передней. В качестве открытого оформления применяется либо

плоский экран (щит), либо ящик, обычно имеющий форму параллелепипеда, с перфорированной задней стенкой.

Открытое акустическое оформление наиболее распространено как в нашей стране, так и за рубежом. Оно используется в телевизорах, переносных радиоприемниках всех классов, кассетных магнитофонах, абонентских громкоговорителях, а также в большей части катушечных магнитофонов, стационарных радиоприемников и электрофонов. Можно сказать, что за исключением высококачественной звуковоспроизводящей радиоаппаратуры с выносными АС, вся остальная бытовая звуковоспроизводящая аппаратура имеет открытое акустическое оформление.

Достоинство открытых АС — простота и, кроме того, в них не имеет места повышение резонансной частоты по сравнению с резонансной частотой применяемой головки, а принципиально возможно и понижение этой частоты, что выгодно отличает открытую АС, например, от закрытой. Недостаток открытой системы — сравнительно бо́льшие размеры этого оформления, когда требуется воспроизведение низших частот звукового диапазона.

Наиболее простой вид открытого оформления — плоский экран. Даже при сравнительно небольших его размерах воспроизведение низких частот значительно улучшается. Вместе с тем в области средних и особенно высоких частот экран уже не оказывает существенного влияния. Конструктивно экран рекомендуется выполнять в виде толстой доски или фанеры толщиной 10—20 мм, в которой вырезано отверстие по периметру диффузородержателя головки, куда вставляется головка. Экран выполняется квадратной или прямоугольной формы. Соотношения сторон прямоугольного экрана могут колебаться в довольно широких пределах. Предпочтительное отношение сторон прямоугольного экрана в пределах от 2 : 1 до 3 : 1.

Размещать головку рекомендуется в центре прямоугольного экрана. Смещение от центра уменьшает звуковое давление АС и ухудшает ее частотную характеристику. Для квадратных экранов некоторое смещение места установки головки улучшает частотную характеристику, поскольку при симметричном креплении головки на частотной характеристике появляется глубокий провал в области средних частот. На рис. 27 показана форма частотной характеристики при смещении головки от центра.

На рис. 28 приведена конструкция стандартного акустического экрана, предусмотренная ГОСТ 16122—78 «Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний и измерений». С помощью этой конструкции измеряют параметры головок.

Практически конструкции плоского экрана могут выполняться, например, в виде щита, помещаемого в углу комнаты (рис. 29).

Установка щита с головкой в углу комнаты позволяет уменьшить его размеры. Щит в виде треугольника или трапеции подвешивают, например, в углу у потолка. Между верхней кромкой щита и потолком необходимо оставить широкую щель, а пространство позади щита рекомендуется заполнить звукопоглощающим

материалом. Головку необходимо защитить от возможных повреждений и пыли.

Встречаются описания АС, в которых головка вставляется в отверстие в стене комнаты, т. е. стена является экраном. Принци-

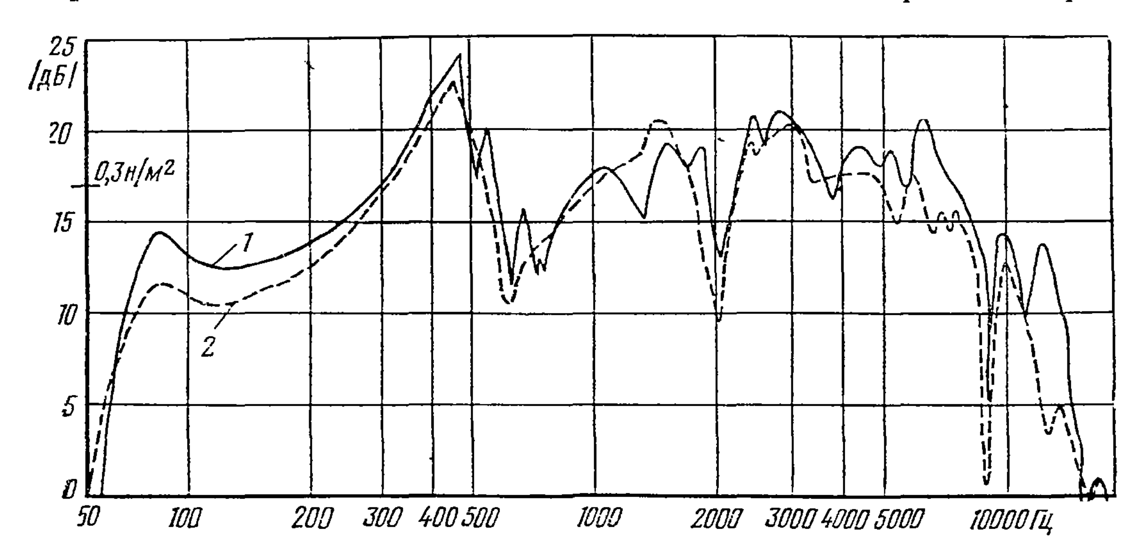


РИС. 27. Частотные характеристики головки при ее центральном расположении в прямоугольном экране (*1*) и при смещении вдоль длинной стороны (*2*)

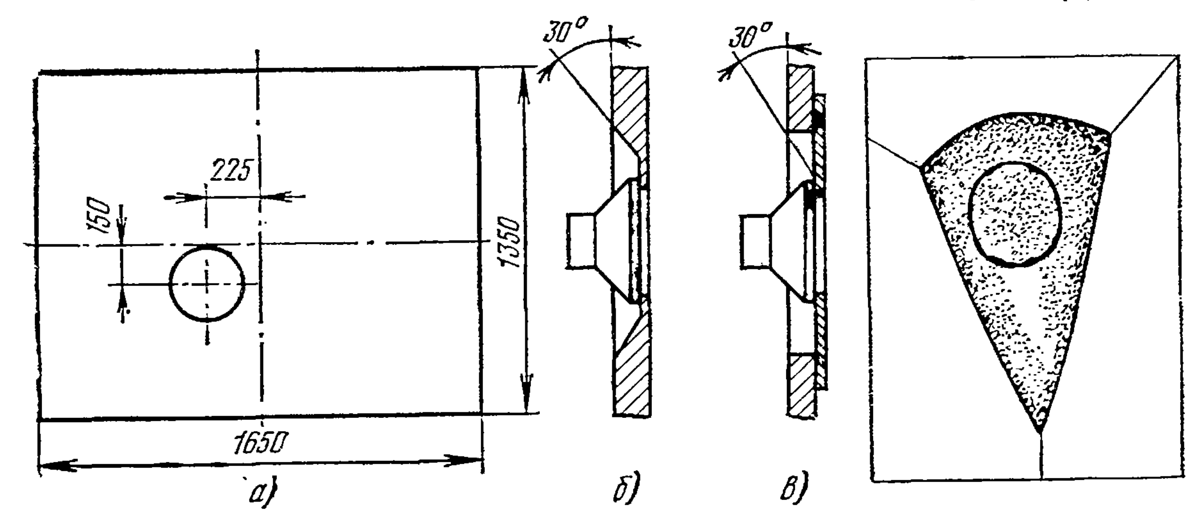


РИС. 28. Стандартный акустический экран для измерения головок прямого излучения (*а*) и способы крепления головок в экране (*б*, *в*)

РИС. 29. Открытое акустическое оформление в виде щита, подвешенного в углу комнаты

пиально такое конструктивное решение выгодно, но при этом не надо забывать, что звучание АС будет иметь место не только в той комнате, в которой АС предназначена работать, но и в той, куда выходит задняя поверхность головки, что, конечно, не всегда желательно. Если же такое решение возможно, то оно дает заметное улучшение частотной характеристики и качества звучания, особенно на низких частотах.

Определим, каким должен быть размер экрана? Желателен такой экран, который позволил бы на нижней граничной частоте

воспроизводимого диапазона получить такой же уровень звукового давления, как и на верхней границе поршневого диапазона $f_{гр.в}$ зоны его действия, т. е. выровнять звуковое давление на нижних и средних частотах. Значение $f_{гр.в}$ может быть найдено из (27). Выбор нижней граничной частоты зависит от добротности применяемой головки. Ранее отмечалось, что форма частотной характеристики головки при $Q<1{,}93$ монотонно возрастает, а при $Q\geqslant 1{,}93$ на частотной характеристике появляются провал на частоте ω_2 и пик на частоте ω_1. Добротность головки при помещении ее в плоский щит практически не меняется. Неравномерность частотной характеристики при $Q<1{,}93$ и при правильном выборе размеров экрана определяется только спадом в область более низких частот. Поэтому за нижнюю граничную частоту при $Q<1{,}93$ выбирают резонансную частоту головки ω_0. При $Q\geqslant 1{,}93$ за нижнюю граничную частоту обычно выбирают частоту пика ω_1 частотной характеристики головки (рис. 23, кривая *2*) и неравномерность частотной характеристики в этом случае определяется провалом на частоте ω_2. Однако при этом несколько сужается расчетный диапазон воспроизводимых частот по сравнению с его значением при $Q<1{,}93$.

Для устранения этого недостатка авторами предложен другой способ выбора нижней граничной частоты воспроизводимого диапазона, позволяющий снизить ее значение. Суть его заключается в том, что нижняя граничная частота выбирается на частоте

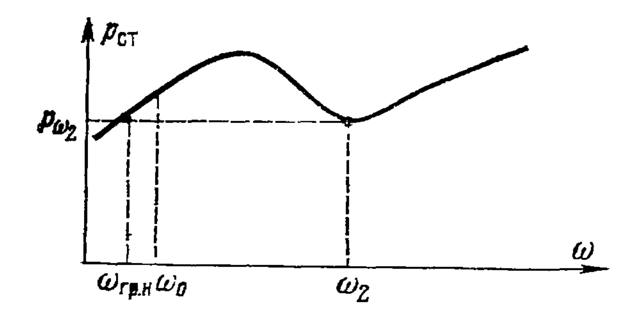


РИС. 30. Типичная частотная характеристика открытого акустического оформления в области низких частот при $Q>1{,}93$

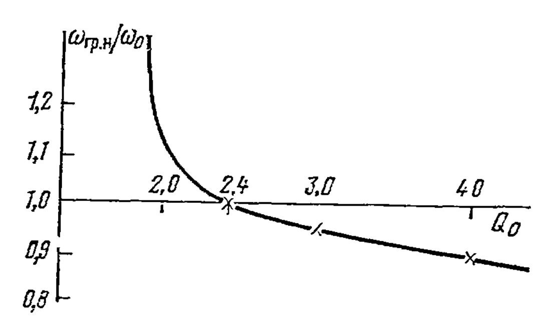


РИС. 32. Зависимость $f_{гр.н}$ от Q

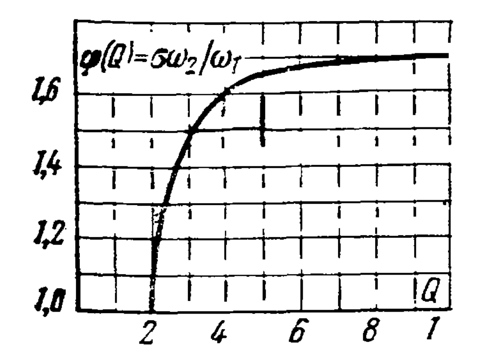


РИС. 31. Зависимость $\varphi(Q)$ от Q

$\omega<\omega_1$, на которой уровень частотной характеристики равен ее уровню на частоте провала ω_2 (рис. 30). В зависимости от значения Q эта частота может быть несколько выше или ниже ω_0. Исследования показали, что наиболее рациональная добротность головки для открытых АС равна 2,4. При этом нижняя граничная частота открытой АС $f_{гр.н}$ совпадает с резонансной частотой головки ω_0.

Площадь экрана, исходя из обеспечения наиболее равномерной характеристики, может быть определена как

$$S=0{,}15\frac{c^2}{f_{\text{гр.н}}^2\,\varphi^2(Q)},\qquad (28)$$

где $\varphi(Q)$ — некоторая функция от Q, при $1{,}93<Q<2{,}5$ приближенно равна Q; $f_{\text{гр.н}}$ — определяется по рис. 32. При $Q<1{,}93$ выражение (28) имеет вид

$$S=0{,}15\frac{c^2}{f_0^2Q^2}.\qquad (29)$$

Обычно экраны выполняют меньших размеров, чем рекомендовано в (28) и (29). Тогда на нижней граничной частоте следует ожидать спада частотной характеристики на

$$N_{\text{дБ}}=10\lg\frac{S'}{S},\qquad (30)$$

где S — вычисленная по (28) и (29) площадь экрана; S' — фактическая площадь экрана.

Пример расчета экрана. Пусть требуется рассчитать размеры экрана для головки 0,5ГД-37 со следующими параметрами: $f_0=315$ Гц; $d=0{,}08$ м; $Q=2{,}3$; $m_0=1{,}2\cdot10^{-3}$ кГ, если допустимый спад частотной характеристики на $f_{\text{гр.н}}$ равен 6 дБ. (Величина m_0 будет использована в следующем примере.)

1. Из (27) находим: $f_{\text{гр.в}}=\frac{1{,}4\cdot343}{3{,}14\cdot0{,}08}=1920$ Гц.
2. По рис. 32 определяем: $f_{\text{гр.н}}=315$ Гц.
3. $\varphi(Q)\approx Q=2{,}3$.
4. Площадь экрана по (28): $S=0{,}15\cdot343^2/315^2\cdot2{,}3^2=0{,}034$ м^2.
5. При допустимом спаде частотной характеристики на нижней граничной частоте, равном 6 дБ, из (30) находим: $S'=0{,}017$ м^2.
6. Выбираем размеры экрана равными $(0{,}17\times0{,}1)$ м^2.

Открытый корпус. Самый распространенный вид открытого акустического оформления — ящик, у которого задняя стенка имеет ряд сквозных отверстий или же полностью отсутствует. Головка устанавливается обычно на передней панели ящика. Его внутренний объем, как правило, используется для размещения деталей электрической схемы, например радиоприемника. Выносные АС в виде открытых корпусов применяются реже. Акустическое действие открытого оформления подобно действию экрана. Наибольшее влияние на частотную характеристику акустической системы с открытым оформлением оказывает передняя стенка, т. е. та, на которой крепится головка. Вопреки довольно распространенному мнению боковые стенки открытого оформления влияют на характеристику открытого оформления мало. Поэтому не рекомендуется делать открытое оформление глубоким, а надо стараться

по возможности увеличивать переднюю панель оформления На рис. 33 показаны различные частотные характеристики АС с открытым оформлением в зависимости от его глубины. Обычно открытое оформление выполняют такой глубины, чтобы головка помещалась в нем с некоторым технологическим запасом (20% от глубины головки). При этом «вклад» боковых стенок в суммарное звуковое давление открытого корпуса составляет **1—3 дБ.**

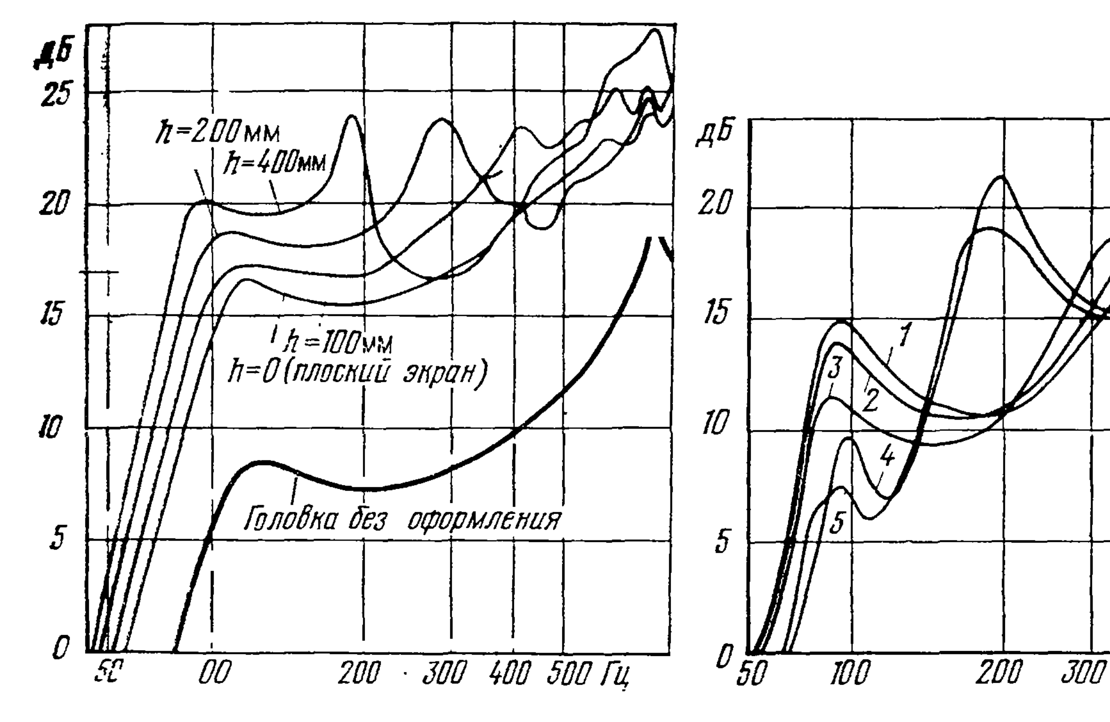


РИС. 33. Частотная характеристика головки в открытом оформлении с разной глубиной h

РИС. 34. Частотные характеристики головки в открытом оформлении с задней стенкой, выполненной из:

2, 3 — слои поролона толщиной соответственно 5 и 15 мм; *4* — электрокартона толщиной 3 мм; *5* — электрокартона (3 мм) со слоем поролона (20 мм) (*1* — ящик без задней стенки)

Однако авторами было установлено, что наличие боковых стенок создает эффект снижения резонансной частоты открытого оформления с увеличением его глубины, которое происходит за счет присоединения части массы воздуха внутри оформления к массе подвижной системы головки. Резонансная частота в этом случае

$$f_{02}=\frac{f_0}{\sqrt{1+\frac{\rho h S_{эфф}}{m_0}}}, \qquad (31)$$

а глубина оформления для получения нужной резонансной частоты

$$h=\left(\frac{f_0^2}{f_{02}^2}-1\right)\frac{m_0}{\rho S_{эфф}}.$$

Конечно, если сделать оформление очень глубоким, то оно может действовать как труба, резонирующая на ряде частот, тем более низких, чем больше длина трубы. Естественно, что это нежелательно, поскольку такие резонансы являются причиной появления пиков и провалов на частотной характеристике АС.

Размеры передней панели, как уже говорилось, желательно иметь как можно больше. Ограничением здесь являются только соображения удобства размещения и пользования. Что касается места установки головки на передней панели, то рекомендации тут такие же, как при плоском экране.

Площадь передней панели открытого акустического оформления с учетом влияния глубины оформления h может быть найдена как

$$S = 0{,}125\,c^2/[f^2_{\text{гр.н}}\,\varphi^2(Q)], \qquad (32)$$

где $\varphi(Q)$ и $f_{\text{гр.н}}$ определяются так же, как в (28), однако необходимо учитывать, что вместо частоты f_0 необходимо подставлять частоту f_{02}, определяемую из (31).

При $Q<1{,}93$ выражение (32) упрощается

$$S = 0{,}125\,c^2/(f^2_{02}\,Q^2), \qquad (33)$$

где f_{02} определяется из (31).

Имеется еще один элемент открытого оформления, который может влиять на работу открытой АС. Это задняя стенка оформления, которая служит для защиты элементов схемы радиоустройства. Она должна быть по крайней мере такой, чтобы не ухудшать акустические параметры системы. На рис. 34 приведены частотные характеристики АС с открытыми корпусами с задними стенками, выполненными из различных материалов (с разной их толщиной). Как видно, материал и толщина задней стенки сильно влияют на частотную характеристику открытой системы. Акустические параметры открытой АС зависят также и от размеров и числа перфораций (отверстий) в задней стенке.

На рис. 35 приведены частотные характеристи-

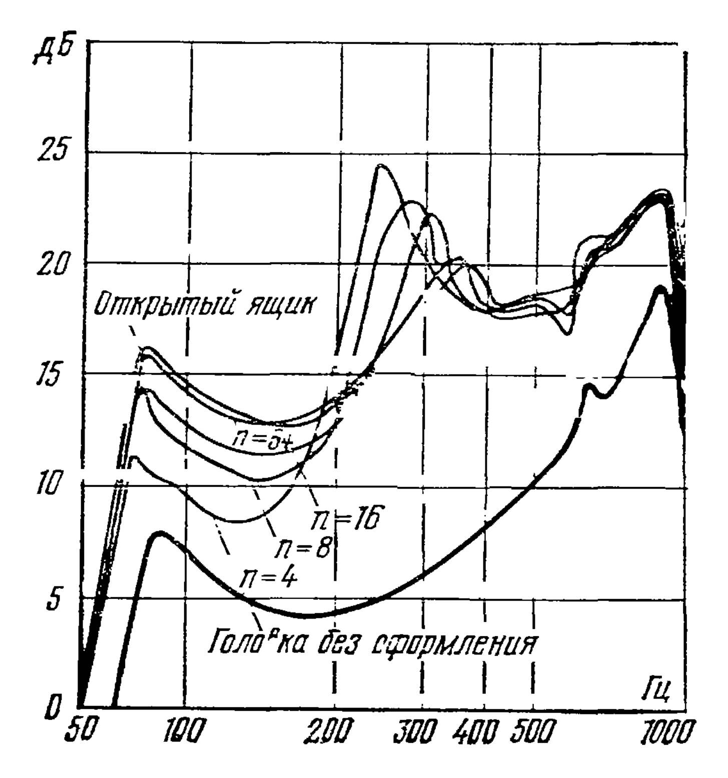


РИС. 35. Частотные характеристики головки в открытом оформлении с различным числом отверстий (n) диаметром 20 мм в задней стенке

ки АС в ящиках с различным числом перфораций в поверхности задних стенок. Для оценки влияния перфораций вводится термин — степень перфорированности задней стенки, A_0/A — это отношение общей площади равномерно распределенных отверстий A_0 к площади задней стенки A. Степень перфорированности задней стенки должна составлять не менее 0,1 для оформлений с объемом оформления 5 л и 0,15—0,20 для оформлений с объемом менее 5 л.

Конфигурация оформления оказывает большое влияние на форму частотной характеристики на средних частотах, вызывая появление многочисленных пиков и провалов при неудачной конфигурации. Это хорошо видно из рассмотрения графиков на рис. 36, где приведены частотные характеристики для разных конфигураций оформления: сферического (шара), куба, усеченной пирамиды, параллелепипеда. Наиболее благоприятная форма — сфера. Приведенные характеристики следует иметь в виду при выборе конфигурации оформления, хотя из конструктивных соображений редко можно применить благоприятную форму из числа приведенных на рис. 36, за исключением параллелепипеда. Из эстетических соображений размеры оформления в виде параллелепипеда часто выбирают так, чтобы размеры лицевой панели (длина и ширина) и глубины относились как $2:\sqrt{2}:1$.

Пример расчета. Требуется рассчитать размеры передней панели открытого оформления глубиной $h=80$ мм для головки 0,5 ГД-37 (см. предыдущий пример).

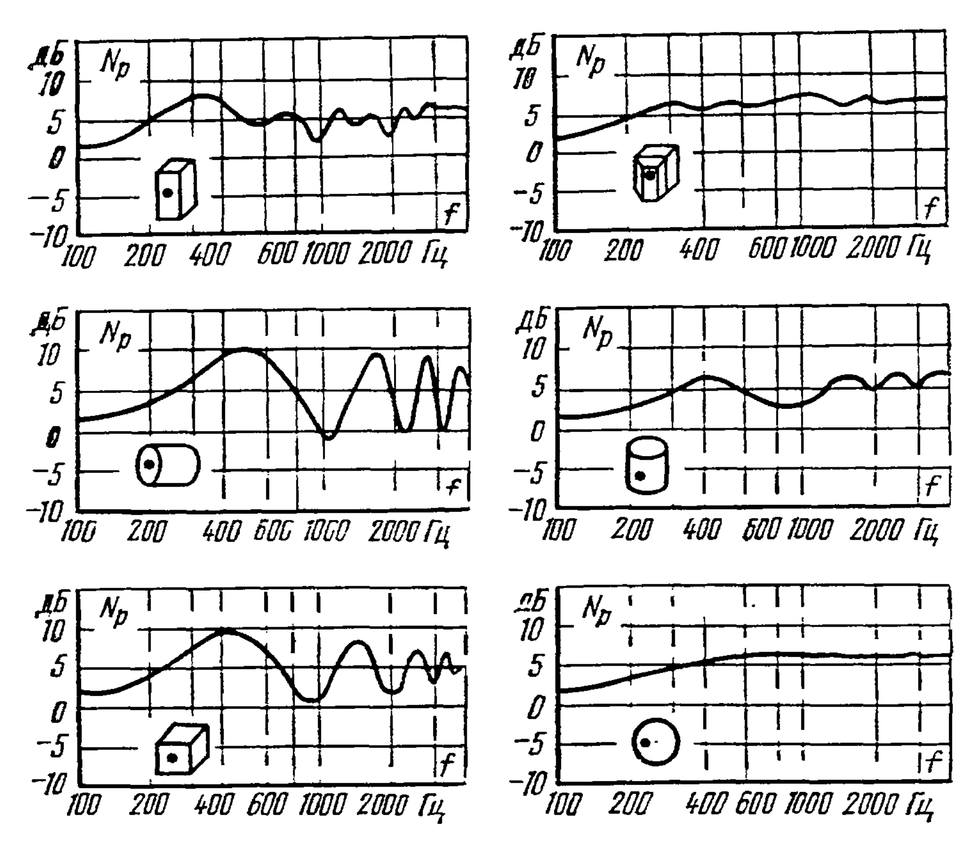


РИС. 36. Частотные характеристики головки в ящиках различной формы (точка обозначает местоположение головки)

1. Из (27) находим граничную частоту: $f_{гр.в}=\frac{1,4\cdot 3{,}3}{3,14\cdot 0,08}=1920$ Гц.

2. По (31) определяем резонансную частоту головки в открытом оформлении с учетом его глубины:

$$f_{02}=\frac{315}{\sqrt{1+\frac{1,3\cdot 0,08\cdot 3,14\cdot (0,04)^2}{1,2\cdot 10^{-3}}}}=262 \text{ Гц}.$$

3. По графику на рис. 32 находим нижнюю граничную частоту воспроизводимого диапазона при $Q=2{,}3$; $f_{гр.н}\approx 260$ Гц.

4. По графику на рис. 33 находим разность уровней пик — провал: $N=1{,}0$ дБ.

5. $\varphi(Q)\approx Q=2{,}3$.

6. По (32) определяем площадь передней панели оформления: $S=0{,}125\cdot 343^2/(260^2\cdot 2{,}3^2)=0{,}041$ м².

При спаде на частоте $f_{гр.н}$, равном 6 дБ, по (30) находим, что $S'=0{,}02$ м².

7. Выбираем размер передней панели равным $0{,}17\times 0{,}12$ м².

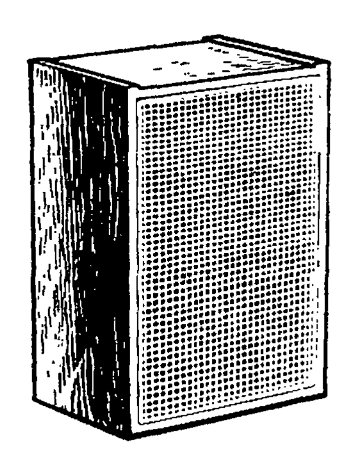
ЗАКРЫТОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ

Очень большое распространение в последние годы получили закрытые АС, которые до недавнего времени были единственным видом АС для высококачественного воспроизведения как в нашей стране, так и за рубежом. И только в последние годы АС с фазоинвертором (АС с ФИ) и АС с пассивным излучателем (АС с ПИ) нарушили монополию закрытых АС. Тем не менее закрытые АС и в настоящее время являются одной из наиболее распространенных конструкций высококачественных АС в Западной Европе и довольно широко выпускаются в США, как это было видно из табл. 2.

На рис. 37 представлена типичная закрытая АС и ее электрический аналог. Преимущество закрытой АС заключается в том, что задняя поверхность диффузора головки не излучает и, таким образом, полностью отсутствует «акустическое короткое замыкание». Недостатком закрытых АС является то, что диффузоры их головок натружены дополнительной упругостью объема воздуха внутри оформления. Наличие дополнительной упругости приводит к повышению резонансной частоты подвижной системы головки в закрытом оформлении ω_{01} и, как следствие, к сужению снизу воспроизводимого диапазона частот. Значение дополнительной упругости объема воздуха $S_в$ может быть найдено как

$$S_в=\gamma p_0 S^2_{эфф}/V, \qquad (34)$$

где γ — показатель адиабаты; $S_{эфф}$ — эффективная площадь диффузора головки; V — внутренний объем корпуса оформления.



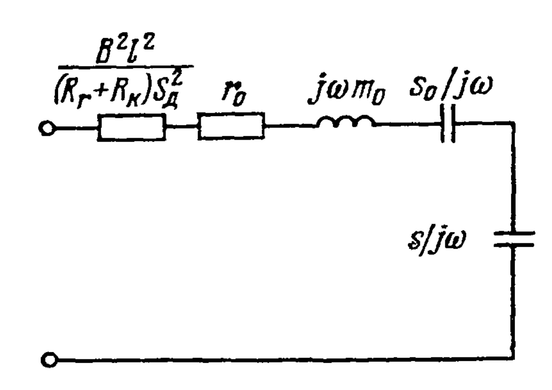


РИС. 37. Типичная закрытая акустическая система и ее электроакустический аналог

Эффективной площадью диффузора считают 50—60% его конструктивной площади. Для круглого диффузора диаметром d $S_{эфф}=0{,}55S=0{,}44d^2$. Это эквивалентно тому, что эффективный диаметр диффузора составляет 0,8 от конструктивного диаметра. Упругость $s_в$ суммируется с собственной упругостью подвеса подвижной системы головки s_0 и в результате резонансная частота головки в закрытом оформлении

$$\omega_{01}=\sqrt{\frac{s_0+s_в}{m}}=\omega_0\sqrt{1+\frac{s_в}{s_0}}, \tag{35}$$

где m_0 — масса подвижной системы головки.

Как видно из (34), упругость воздушного объема внутри оформления обратно пропорциональна этому объему. Упругость подвижной системы можно также выразить через упругость некоторого эквивалентного объема воздуха $V_э$, имеющего упругость s_0. Отсюда резонансная частота головки в закрытом оформлении

$$\omega_{01}=\omega_0\sqrt{1+V_э/V}. \tag{36}$$

Чтобы резонансная частота все же не была чрезмерно высокой, иногда применяют головки с более тяжелой подвижной системой, что позволяет несколько снизить резонансную частоту головки в закрытом оформлении, как это видно из (35). Однако следует иметь в виду, что увеличение массы подвижной системы снижает чувствительность АС, как это видно из формулы для стандартного звукового давления:

$$p_{ст}=\frac{\rho a^3\omega}{\sqrt{40}\,m_0\,\omega_{01}}\sqrt{\frac{B^2l^2}{R_г+R_к}}\,\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Q_{01}^2}+\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_{01}}{\omega}\right)^2}}=$$

$$=A\frac{\omega/\omega_0}{\sqrt{\frac{1}{Q_{01}^2}+\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_{01}}{\omega}\right)^2}}. \tag{37}$$

где A — частотно-независимый множитель; $R_г$ — выходное сопротивление усилителя (генератора); $R_к$ — активное сопротивление звуковой катушки; a — эффективный радиус головки.

Особенно малой эффективностью обладают так называемые малогабаритные акустические системы (МАС), у которых упругость объема внутри оформления существенно больше упругости закрепления подвижной системы головки. Такие системы, у которых упругость подвижной системы определяется упругостью объема воздуха внутри оформления, называются системами «с компрессионным подвесом» головки. Стандартное звуковое давление $p_{ст}$ такой системы на частотах $\omega > \omega_{01}$, где $p_{ст}$ частотно-независимо, определяется как

$$p_{ст} = 2{,}65 \cdot 10^{-3} \sqrt{f_{01}^3 V/Q_{01}},$$

где Q_{01} — добротность головки в закрытом оформлении.

Как следует из (37), неравномерность частотной характеристики закрытых АС в области низких частот так же, как и открытых, определяется их добротностью (рис. 38). При $Q_{01} < 0{,}707$ частотная характеристика АС равномерно понижается с понижением частоты в область низких частот и неравномерность проявляется как спад на резонансной частоте ω_{01} по сравнению с высшими частотами. При $0{,}707 < Q_{01} < 1{,}0$ частотная характеристика имеет небольшой пик на частоте ω_1 и далее спад на резонансной частоте ω_{01}. Неравномерность частотной характеристики при этом определяется подъемом на пике ω_1 и спадом на резонансной частоте ω_{01}. При $Q_{01} > 1$ неравномерность частотной характеристики определяется только пиком на частоте ω_1 относительно горизонтальной части характеристики.

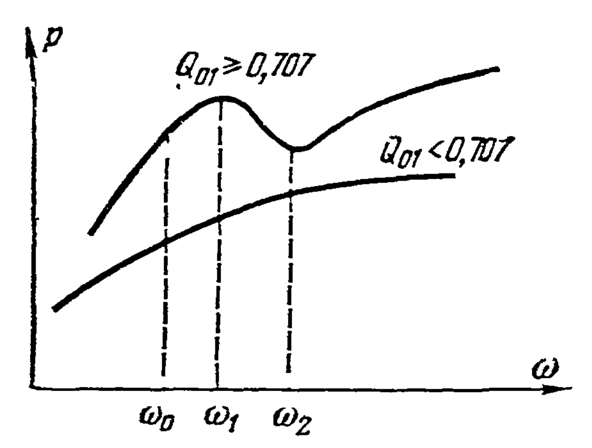


РИС. 38. Частотная характеристика закрытой системы

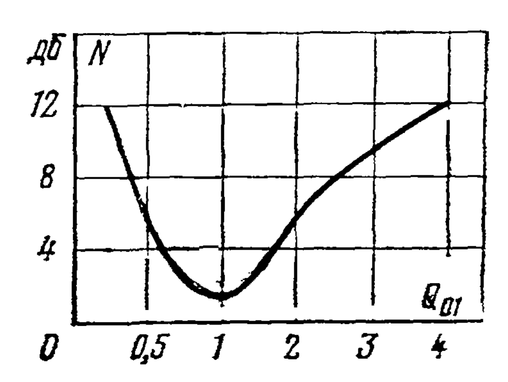


РИС. 39. Зависимость неравномерности частотной характеристики закрытой АС от Q_{01}

Неравномерность частотной характеристики в зависимости от добротности закрытой АС приведена на рис. 39. Как следует и рисунка, минимальная неравномерность частотной характеристики закрытых АС имеет место при добротности $Q_{01} = 1$ и составля-

ет 1,3 дБ. Желательная же добротность самой головки находится из условия

$$Q=\frac{Q_{01}}{\sqrt{1+V_э/V}}. \qquad (38)$$

Исследования авторов показали, что добротность головок, предназначенных для закрытых АС, не должна превышать 0,8—1,0. В противном случае головка получается «раздемпфированной». Это означает, что при ее возбуждении, т. е. при подаче на нее напряжения музыкальной или речевой программы, головка помимо колебаний в такт с поданным напряжением будет колебаться и с частотой собственных колебаний, близкой к резонансной частоте. Для слушателей это будет проявляться в том, что к звучанию программы будет примешиваться звучание этой частоты как своего рода «гудение», «нечистота» низких тонов. Отметим также, что если головка помещена в закрытом ящике, ухудшается равномерность частотной характеристики в области средних и высоких частот из-за резонансных явлений в оформлении. Для их устранения внутренние поверхности (особенно заднюю стенку) покрывают звукопоглощающим материалом и заполняют им часть объема. Кроме того, заполнением внутреннего объема рыхлым звукопоглощающим материалом преследуют и другую цель — изменить термодинамический процесс сжатия — расширения воздуха в оформлении.

Без заполнения процесс сжатия — расширения воздуха внутри оформления адиабатический. Заполняя оформление рыхлым звукопоглощающим материалом можно сделать так, чтобы адиабатический процесс сменился на изотермический. В этом случае внутренний объем оформления как бы увеличивается в 1,4 раза, так как коэффициент γ в (34), составляющий 1,4 для адиабаты, заменяется значением, равным единице для изотермы. Соответственно снижается и резонансная частота закрытой АС. Это снижение в пределе (для компрессионной АС) достигает $\sqrt{1,4}$, так как для нее можно пренебречь упругостью подвеса головки. В противном случае резонансная частота головки ω'_{01} может быть найдена как

$$\omega'_{01}=\omega_{01}\sqrt{\frac{1+0{,}75\,s/s_0}{1+s/s_0}}.$$

Как практически определить, что изотермический процесс сжатия — расширения воздуха внутри оформления достигнут? Процесс будет достигнут, если при добавлении внутрь оформления новой порции рыхлого звукопоглощающего материала резонансная частота закрытой АС уже не понижается. Исследования авторов показали, что заполнять внутренний объем оформления более, чем на 60%, нецелесообразно. Вместе с тем количество рыхлого звукопоглощающего материала не должно быть чрезмерным, чтобы активные акустические потери в оформлении и заполнении не были значительны. Следует отметить, что степень влияния активных

акустических потерь в оформлении (и заполнении) на ход частотной характеристики зависит, строго говоря, не от их абсолютных значений, а от соотношения активных акустических потерь в оформлении и полных потерь в головке. Потери в головке — это собственные акустико-механические активные потери (r_0) на внутреннее трение в материале головки, трение о воздух при работе, потери в виде активной составляющей сопротивления излучения и т. д., а также «вносимые» в головку потери ($r_{вн}$). Авторы рекомендуют следующий критерий допустимости активных потерь в оформлении и заполнении:

$$(r_{вн}+r_0)/(r_{оф}+r_{зап})>10, \quad (39)$$

где $r_{оф}$, $r_{зап}$ — активные акустические потери в оформлении и в заполнении соответственно. При меньшем соотношении потерь АС должна быть переделана.

Нахождение значений активных потерь в оформлении и заполнении, а также способы уменьшения их описаны далее.

Чрезмерные активные акустические потери могут быть в АС при некачественном (с акустической точки зрения) выполнении корпуса оформления, креплении головки, при чрезмерном заполнении оформления звукопоглощающим материалом, а также при чрезмерно малых внутренних объемов оформления ($V_э/V>8$).

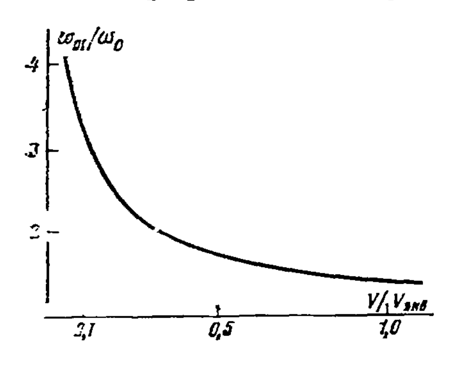


РИС. 40 Зависимость ω_{01}/ω_0 от $V_э/V$

В заключение для быстрого расчета закрытых АС предлагается графический метод. По графикам на рис. 40—45 можно для заданной головки с присущими ей параметрами подобрать рациональное оформление, и наоборот, по заданному оформлению выбрать подходящую головку. Для конкретного расчета используется пара графиков из представленных на рис. 40—45. Рисунок 40, на котором представлена зависимость ω_{01}/ω_0 от $V_э/V$ — общий при расчете. Из рис. 41—45 выбирается один — в зависимости от добротности применяемой головки (от 0,4 до 0,8). На этих рисунках представлены семейства кривых зависимости $V_э/V$ от $\omega_{гр}/\omega_0$, где $\omega_{гр}$ — нижняя граничная частота воспроизводимого диапазона. Параметром системы является значение спада частотной характеристики (дБ) на частоте $\omega_{гр}$. Кроме того, на каждом графике справа нанесена дополнительная ось, по которой отложено значение $\sqrt{1+V/V_э}$, с помощью которого можно определить стандартное звуковое давление закрытой АС на горизонтальной части характеристики [исходя из (38)] в виде $p_{ст}=A\sqrt{1+V/V_э}$, $A=2{,}65\times10^{-3}\sqrt{f^3_0V/Q}$ легко вычисляется для заданной головки, так как ω_0, $V_э$ и Q — параметры головки.

Пример расчета. Пусть, например, используется головка с параметрами: $Q=0{,}4$; $f_0=30$ Гц; $V_э=100$ л. Находим предварительно A: $A=2{,}65\cdot10^{-3}\sqrt{30^3\cdot100\cdot10^{-3}/0{,}4}=0{,}218$.

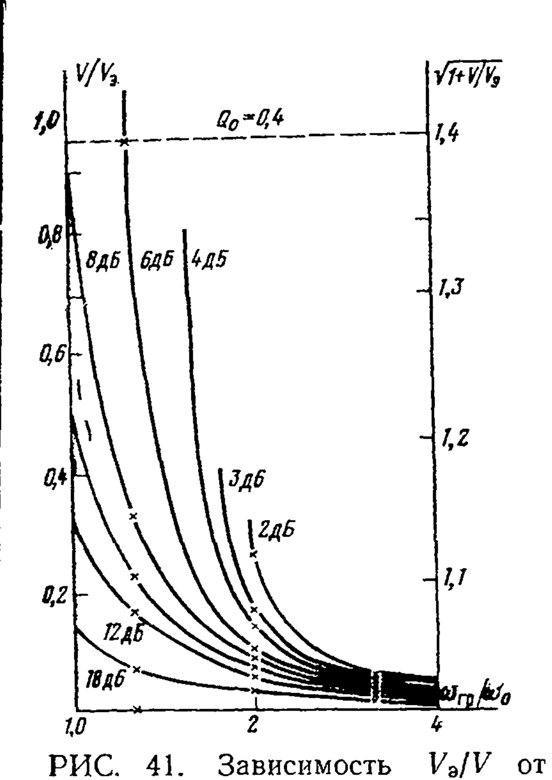


РИС. 41. Зависимость $V_э/V$ от $\omega_{гр}/\omega_0$ при $Q=0{,}4$

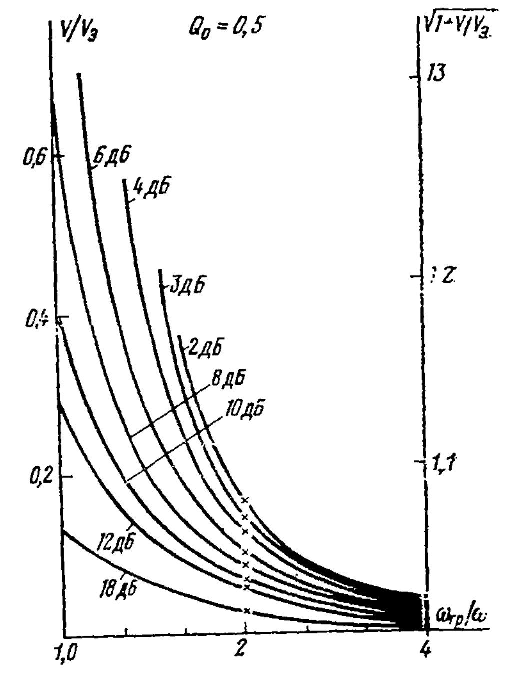


РИС. 42. Зависимость $V_э/V$ от $\omega_{гр}/\omega_0$ при $Q=0{,}5$

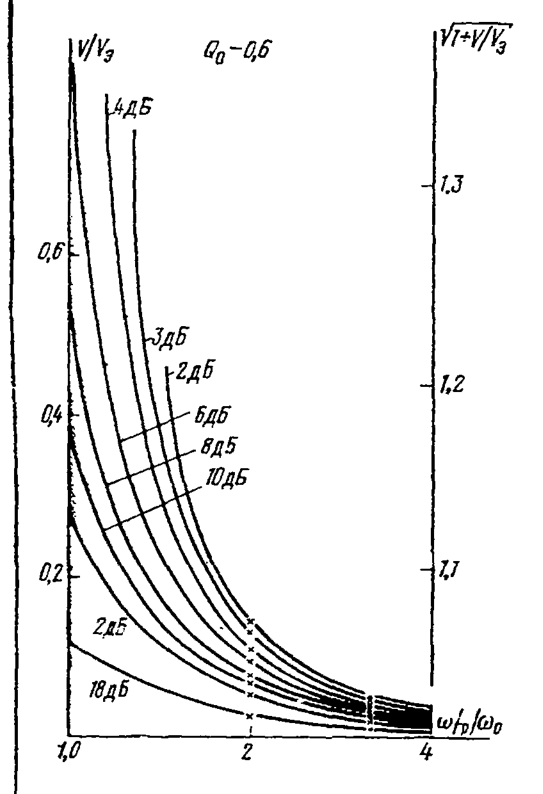


РИС. 43. Зависимость $V_э/V$ от $\omega_{гр}/\omega_0$ при $Q=0{,}6$

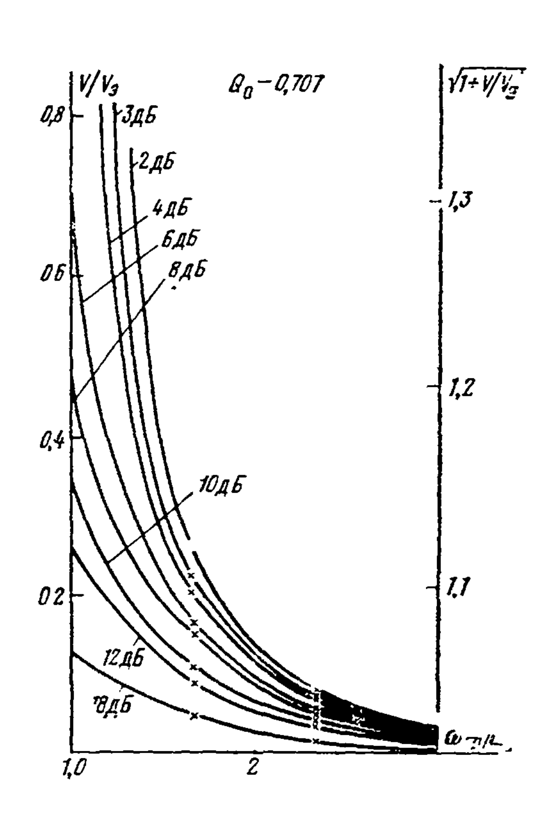


РИС. 44. Зависимость $V_э/V$ от $\omega_{гр}/\omega_0$ при $Q=0{,}7$

Пусть требуется подобрать для этой головки объем оформления V, при котором спад частотной характеристики должен составлять 6 дБ на граничной частоте АС $f_{гр}=40$ Гц.

Выбор оформления проводим следующим образом.

По рис. 41 из точки $\omega_{гр}/\omega_0=40/30=1{,}33$ на горизонтальной оси восстанавливаем ординату до пересечения с кривой с отметкой 6 дБ и из этой точки проводим прямую, параллельную оси абсцисс до пересечения с осью $V/V_э$. Получаем $V/V_э=0{,}95$. Отсюда $V=0{,}95\ V_э=0{,}95\cdot 100=95$ л. Этому значению $V/V_э$ соответствует по правой вертикальной оси значение $\sqrt{1+V/V_э}=1{,}4$. Следовательно, $p_{ст}=2{,}18\cdot 1{,}4=0{,}305$ Па. По графику на рис. 40 находим отношение $\omega_{01}/\omega_0=f_{01}/f_0=1{,}4$. Отсюда $f_{01}=1{,}4f_0=1{,}4\times 30=42$ Гц.

С помощью указанных графиков могут быть решены и другие задачи. Перечислим их, не объясняя подробно, поскольку метод рассуждения примерно тот же. Например, может быть найден спад частотной характеристики на граничной частоте $f_{гр}$ для заданных головок и объема оформления, может также решаться задача подбора головки из числа имеющихся в распоряжении и т. д.

Отметим, что все сказанное справедливо, если известны точные значения параметров головки f_0, $V_э$, Q. Однако обычно, даже зная тип головки и значения ее параметров (табличные), невозможно сказать уверенно, каковы параметры данного экземпляра головки. Для решения задач в этом случае используют графики на рис. 46—48. Единственный параметр, который надо знать точно, — резонансная частота головки без оформления f_0. Определение этого параметра незатруднительно и полученные результаты обычно устойчивы. Рисунки 46—48 различаются тем, что построены для фиксированных значений спада частотной характеристики, не превышающих соответственно 6, 12 и 18 дБ. На каждом рисунке представлены области изменения значений Q и $V_э/V$ в зависимости от $f_{гр}/f_0$. Значение Q и $V_э/V$ могут быть любыми внутри заштрихованных фигур на рисунках.

Пример расчета. Пусть допустимый спад на частоте $f_{гр}=60$ Гц не превышает 6 дБ, f_0 головки (измеренное) $=30$ Гц и $V_э$ (табличное) $=100$ л.

Пользуясь рис. 46, из точки $\omega_{гр}/\omega_0=60/30=2$ восстанавливаем ординату, которая пересечет заштрихованные области Q и $V_э/V$. Значение $V_э/V$ можно выбрать в пределах 3—13, а значение Q в пределах 0,24—1,0. Если выбранные значения Q и $V_э/V$ почему-либо не устраивают, можно менять либо граничную частоту, либо спад.

Рассчитать закрытую АС можно не только по графикам, но и по приведенным формулам.

Пусть, например, требуется рассчитать объем закрытой АС с нижней граничной частотой 50 Гц, имеющей головку 10ГД-36 ($f_0=38$ Гц, $V_э=60$ л, $Q=0{,}8$).

1. Определяем объем оформления из (36): $V=60\cdot 10^{-3}/[(50/38)^2-1]=83$ л.

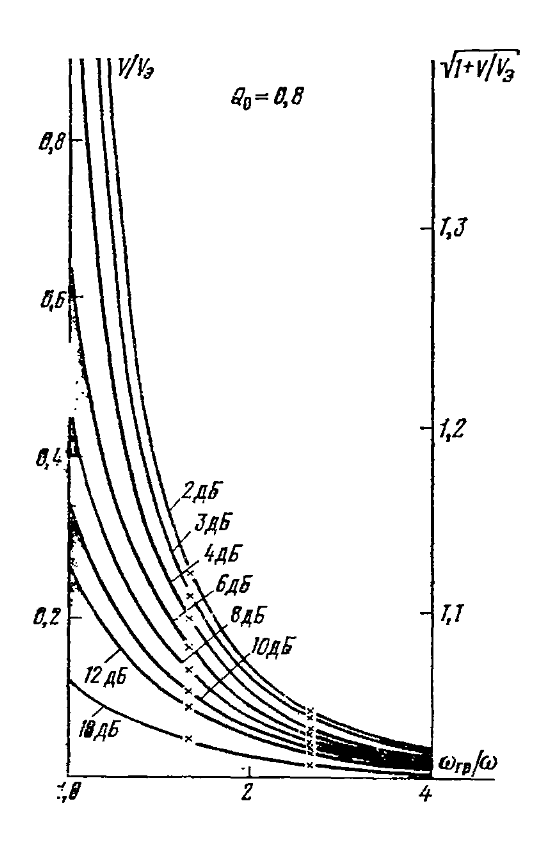


РИС. 45. Зависимость $V_э/V$ от $\omega_{гр}/\omega_0$ при $Q=0,8$

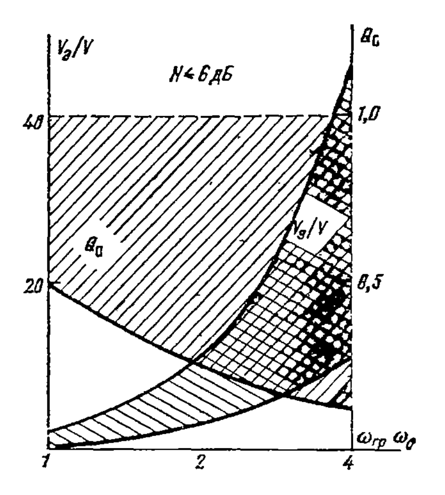


Рис. 46

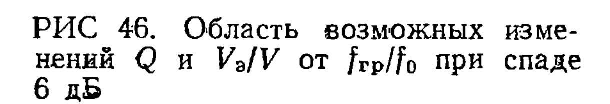


РИС 46. Область возможных изменений Q и $V_э/V$ от $f_{гр}/f_0$ при спаде 6 дБ

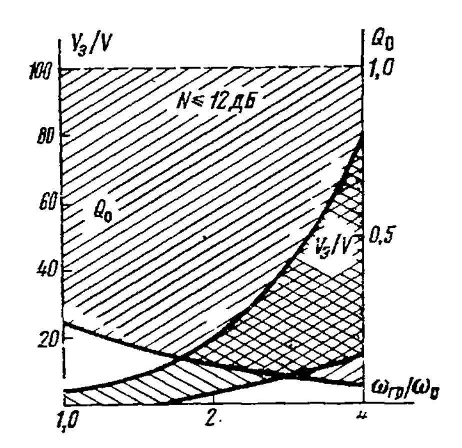


Рис. 47

РИС. 47. Область возможных изменений Q и $V_э/V$ от $f_{гр}/f_0$ при спаде 12 дБ

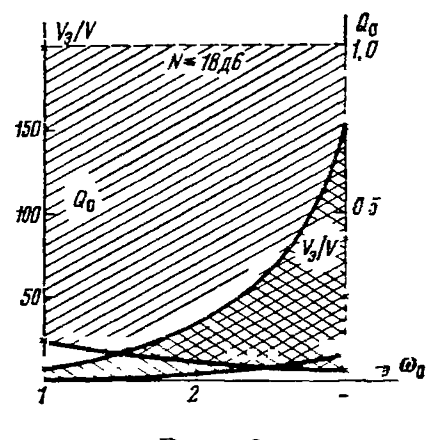


Рис 48

РИС. 48. Область возможных изменений Q и $V_э/V$ от $f_{гр}/f_0$ при спаде 18 дБ

2. Находим добротность головки в закрытом оформлении из (38): $Q_{01}=0{,}8\cdot\sqrt{1+60/83}=1{,}05$.

В соответствии с рис. 39 минимальная неравномерность частотной характеристики имеет место при $Q_0=1$. Так что полученная неравномерность частотной характеристики из-за пика на частоте ω_1 практически минимальна и составляет всего около 1,5 дБ.

Параметры современных отечественных серийно выпускаемых закрытых АС приведены в табл. П.2 приложения. Рекомендации по практическому выполнению АС можно найти далее.

АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ФАЗОИНВЕРТОРОМ

Закрытые АС требуют большого объема оформления для достаточно хорошего воспроизведения низших частот, поэтому получаются громоздкими и тяжелыми. Существующие малогабаритные закрытые АС малочувствительны. Если же требуется иметь закрытую АС меньших габаритных размеров, приходится мириться с тем, что «басов» у нее при этом будет значительно меньше. В значительной степени этого недостатка можно избежать в АС с ФИ. Как видно из табл. 2, в США и Западной Европе число таких систем составляет одну треть типов от общего выпуска, а в Японии — две трети.

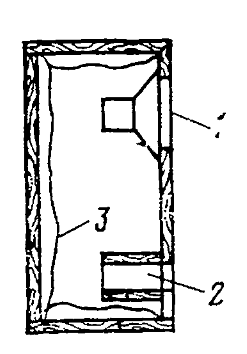


РИС. 49. Акустическая система с ФИ:
1 — головка; 2 — канал (труба) фазоинвертора; 3 — звукопоглощающая обивка

Устройство АС с ФИ показано на рис. 49. Эта АС отличается от закрытой тем, что в корпусе АС с ФИ имеется либо отверстие, либо отверстие с трубой круглого или прямоугольного сечения. Упрощенная схема акустического аналога этой системы представлена на рис. 50. (Более подробно об акустическом аналоге см. приложение 3.) Здесь m — акустическая масса воздуха в отвер-

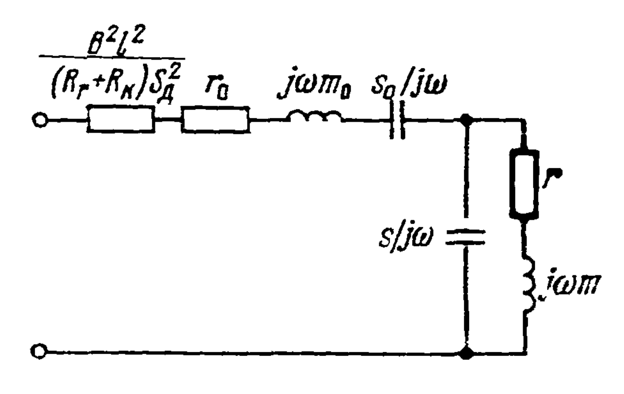


РИС. 50. Упрощенная схема акустического аналога АС с ФИ

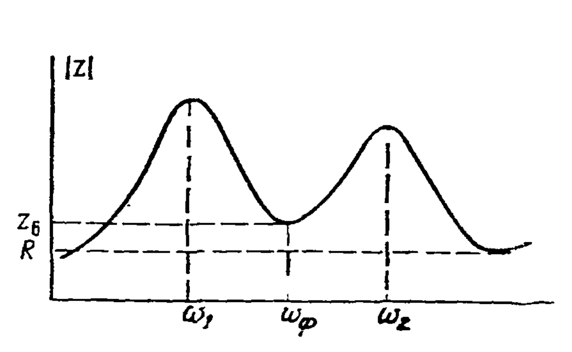


РИС. 51. Зависимость модуля полного электрического сопротивления от частоты для АС с ФИ

стии или трубе фазоинвертора; r — активное акустическое сопротивление в отверстии или трубе фазоинвертора и активная составляющая сопротивления излучения отверстия.

Как видно из рис. 50, АС с ФИ — сложная колебательная система. Благодаря этому и частотная характеристика модуля ее полного электрического сопротивления также сложнее, чем у закрытой АС и имеет вид, представленный на рис. 51.

Принцип действия АС с ФИ заключается в том, что благодаря наличию контура ms (правая ветвь на схеме аналога) звуковое давление в отверстии или выходном отверстии трубы уже не противоположно по фазе звуковому давлению от передней поверхности диффузора низкочастотной головки, а сдвинуто на угол, во всяком случае меньший 180°. Вследствие этого не происходит нейтрализации звуковых давлений от передней и задней поверхностей диффузора, как это имело место в открытых системах. При соответствующем подборе параметров головки, оформления и выборе отверстия (трубы) фазоинвертора можно получить от АС с ФИ значительное улучшение воспроизведения низких частот по сравнению с закрытой АС. Для этого контур фазоинвертора настраивают обычно на частоту, близкую к резонансной частоте применяемой головки. Исследования авторов показали, что расстройка частоты резонанса фазоинвертора относительно частоты резонанса головки практически не должна превышать ±2/3 октавы, а часто и совпадать с ней.

Следует также иметь в виду, что для АС с ФИ подходят головки только с низкой добротностью ($Q<0{,}6$). Кроме того, хорошо рассчитанную АС с ФИ не всегда можно конструктивно выполнить, например, если расчетная длина трубы превысит конструктивно-допустимую. Однако в любом случае длина трубы должна быть меньше $\lambda_н/12$, где $\lambda_н$ — длина волны на резонансной частоте контура ms. Резонансная же частота $f_ф$ контура находится из следующего выражения:

$$f_ф=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{s}{m}}.$$

Рассчитывая звуковое давление АС с ФИ, целесообразно определять не его абсолютную величину $p_ф$, а сравнительную со звуковым давлением соответствующей закрытой системы $p_з$, т. е. такой, которая имеет равный внутренний объем и одинаковую по всем параметрам головку. Это позволяет определить, какой выигрыш по звуковому давлению обеспечивает АС с ФИ по сравнению с закрытой АС.

Исходя из (15) и (18), можно записать, что

$$\frac{p_ф}{p_з}=\frac{\dot{x}_ф}{\dot{x}_0}\sqrt{\frac{r_{sф}}{r_{s0}}}=k\sqrt{\frac{r_{sф}}{r_{s0}}}, \qquad (40)$$

где $r_{sф}=r_{s1}+r_{s2}$

Здесь введены следующие обозначения: $\dot{x}_0$ — средняя объемная скорость поверхности диффузора головки в соответствующем

закрытом оформлении; $\dot{x}_ф$ — суммарная скорость АС (диффузора и ФИ); r_{s0} — активное акустическое сопротивление излучения головки в соответствующем закрытом оформлении; r_{s1} — полное активное акустическое сопротивление излучения диффузора головки с учетом влияния сопротивления излучения отверстия фазоинвертора; r_{s2} — полное активное акустическое сопротивление излучения отверстия фазоинвертора с учетом влияния сопротивления излучения диффузора головки; $r_{sф}$ — суммарное активное акустическое сопротивление излучения АС с ФИ.

Несколько слов об активном акустическом сопротивлении излучения АС с ФИ. Эта АС рассматривается как совокупность двух излучателей, один из которых — собственно головка, а другой — отверстие фазоинвертора. Если рассматривать работу этих излучателей независимо друг от друга, то все сравнительно просто, так как активное сопротивление излучения головки в закрытом оформлении, малом по сравнению с длиной волны, известно [см. выражение r_{s2} в (22)]. Однако при их совместной работе, как это имеет место в АС с ФИ, излучатели оказывают влияние друг на друга. Полные сопротивления излучения в этом случае

$$z_1 = z_{11} + z_{12}, \quad z_2 = z_{22} + z_{21}, \tag{41}$$

где z_1, z_2 — соответственно полное сопротивление излучения головки и отверстия, z_{11}, z_{22} — соответственно собственное сопротивление излучения головки и отверстия, z_{12} — вносимое, учитывающее влияние отверстия на излучение головки, сопротивление излучения, z_{21} — вносимое, учитывающее влияние головки на излучение отверстия, сопротивление излучения.

Вещественные части этих выражений являются активными сопротивлениями излучения головки и отверстия при их взаимном влиянии.

Отметим, что при сближении отверстия и головки суммарное сопротивление излучения АС с ФИ возрастает и тем самым увеличивается создаваемое системой звуковое давление. Примером такой АС с ФИ служит конструкция* (рис. 52), в которой головка расположена внутри отверстия фазоинвертора. При таком расположении головки относительно отверстия вносимое сопротивление излучения будет максимальным.

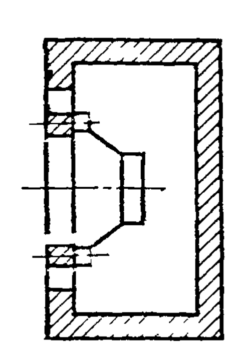
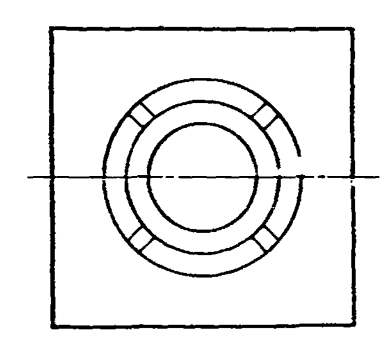



РИС. 52. Схематическое изображение оригинальной конструкции АС с ФИ

В основу расчета АС с ФИ по выражению (40) может быть положена схема акустического аналога АС с ФИ, представленная на рис. 52.

Выражение для p_3 закрытого оформления дано в

* Иофе В. К., Лизунков М. В. Акустический агрегат. А. с. № 847521.

(37). Введя в него обозначения: $t=\omega/\omega_0$ — относительная частота, $n=V_э/V$ — относительный объем оформления, представим (37) в виде

$$p=A\frac{t}{\sqrt{\frac{1}{Q^2}+\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)^2}}. \qquad (42)$$

где A — частотно-независимый множитель.

Нахождение относительного сопротивления излучения АС с ФИ — $\sqrt{r_{sф}/r_{s0}}$ здесь из-за сложности не приводится. Отметим лишь, что в зависимости от площадей диффузора головки и отверстия, их взаимного расположения, а также амплитуд и фаз колебаний на излучающих поверхностях оно может практически изменяться от 1,5 до 2,0 и быть частотно-малозависимым.

Вывод выражения для $k=\dot{x}_ф/\dot{x}_0$ приведен в приложении 4. Здесь приводится лишь окончательное выражение

$$|k|=A\sqrt{\frac{\{1-QQ_ф(t^2-n-1)\}^2+\left\{tlQ_ф+Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)\right\}^2}{\left\{1+QQ_ф\left[nl-\left(t-\frac{1}{t}\right)\left(tl-\frac{1}{tl}\right)\right]\right\}^2+\left\{Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)+Q_ф\left(tl-\frac{1}{tl}\right)\right\}^2}}. \qquad (43)$$

Таким образом, выражение для $p_ф$ из (40) имеет следующий вид:

$$p_ф=(1{,}5\div2{,}0)A\sqrt{\frac{\{1-QQ_ф(t^2-n-1)\}^2+\left\{tlQ_ф+Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)\right\}^2}{\left\{1+QQ_ф\left[nl-\left(t-\frac{1}{t}\right)\left(tl-\frac{1}{tl}\right)\right]\right\}^2+\left\{Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)-Q_ф\left(tl-\frac{1}{tl}\right)\right\}^2}}\cdot\frac{t}{\sqrt{\frac{1}{Q^2}+\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)^2}}. \qquad (44)$$

При настройке фазоинвертора на резонансную частоту фазоинвертора — колебательной системы, состоящей из гибкости воздуха в объеме оформления и массы воздуха в отверстии или трубе фазоинвертора, что часто имеет место, выражение (44) упрощается и принимает вид

$$p_{\Phi}=(1{,}5\div 2{,}0)\,A\sqrt{\frac{\{1-QQ_{\Phi}(t^2-n-1)\}^2+\left\{tQ_{\Phi}+Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)\right\}^2}{\left\{1+QQ_{\Phi}\left[n-\left(t-\frac{1}{t}\right)^2\right]\right\}^2+\left\{Q_{\Phi}\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)+Q\left(t-\frac{1}{t}\right)\right\}^2}}\;\frac{t}{\sqrt{\frac{1}{Q^2}+\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)^2}}. \qquad (45)$$

Поведение АС с ФИ может быть описано с помощью четырех параметров n, l, Q, Q_{Φ}. Исследованиями авторов установлено, что число переменных можно сократить до трех, так как значение Q_{Φ} может быть выбрано фиксированным и в диапазоне $Q_{\Phi}>10$ практически не будет влиять на результаты вычислений.

Здесь, кроме введенных обозначений: $l=\omega_0/\omega_{\Phi}$ — относительная настройка фазоинвертора, $Q=\dfrac{\omega_0 m_0}{\{B^2 l^2/[(R_г+R_к)S_д^2]\}+r_0}$ — добротность головки, $Q_{\Phi}=\omega_{\Phi}m/r$ — добротность фазоинвертора.

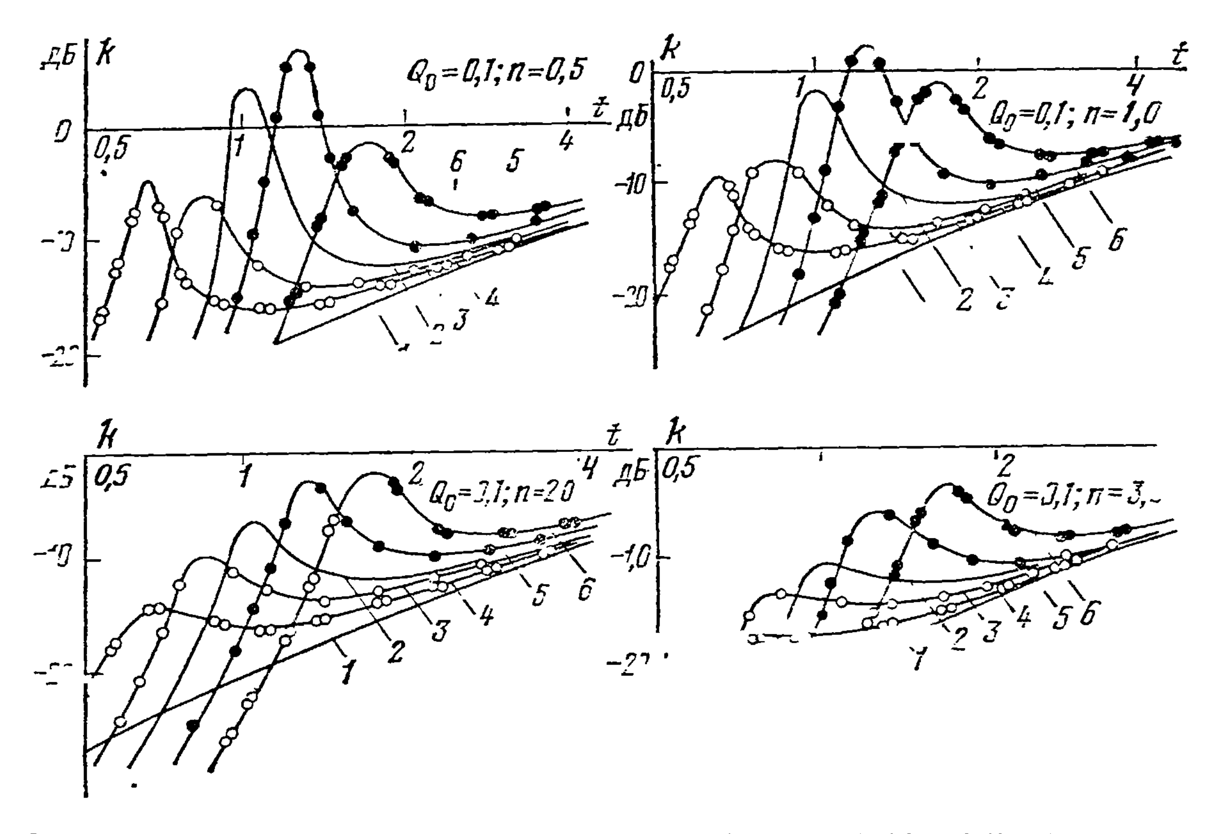


РИС. 53. Семейство частотных характеристик АС с ФИ ($Q_0=0{,}1$). Здесь и на рис. 54, 55, 56 нанесены следующие кривые:

1 — частотная характеристика соответствующей закрытой системы; 2 — частотные характеристики при настройке фазоинвертора на резонансную частоту головки; 3 — при настройке фазоинвертора ниже на 1/3 октавы резонансной частоты головки; 4 — при настройке фазоинвертора выше на 1/3 октавы резонансной частоты головки; 5 — при расстройке фазоинвертора ниже на 2/3 октавы резонансной частоты головки; 6 — при расстройке фазоинвертора выше на 2/3 резонансной частоты головки

Следовательно, работа АС с ФИ определяется добротностью применяемой головки, объемом оформления и настройкой фазоинвертора при условии поддержания добротности фазоинвертора $Q_{\text{ф}}>10$.

Как видно, выражение (44) довольно громоздко. Поэтому для облегчения нахождения результатов на рис. 53—56 приводятся наборы графических зависимостей (семейства частотных характеристик), построенных по выражению (43). Каждый рисунок вы-

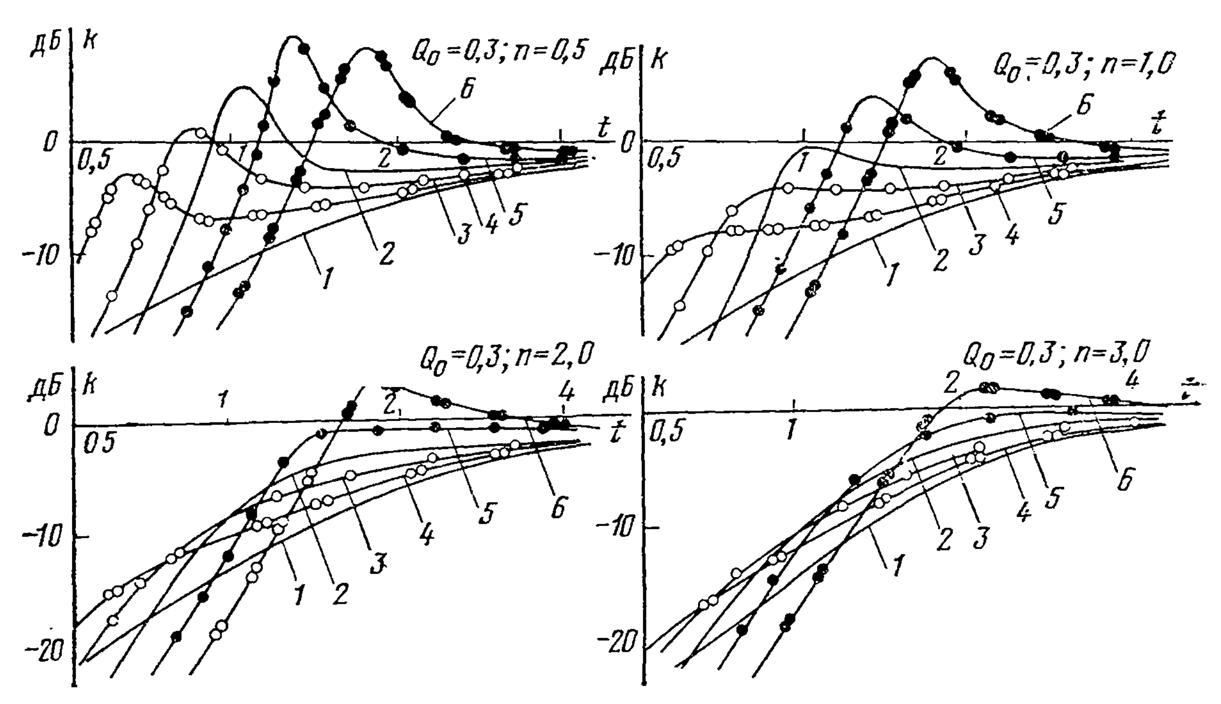


РИС. 54. Семейство частотных характеристик АС с ФИ ($Q_0=0,3$). (Обозначения см. на рис. 53)

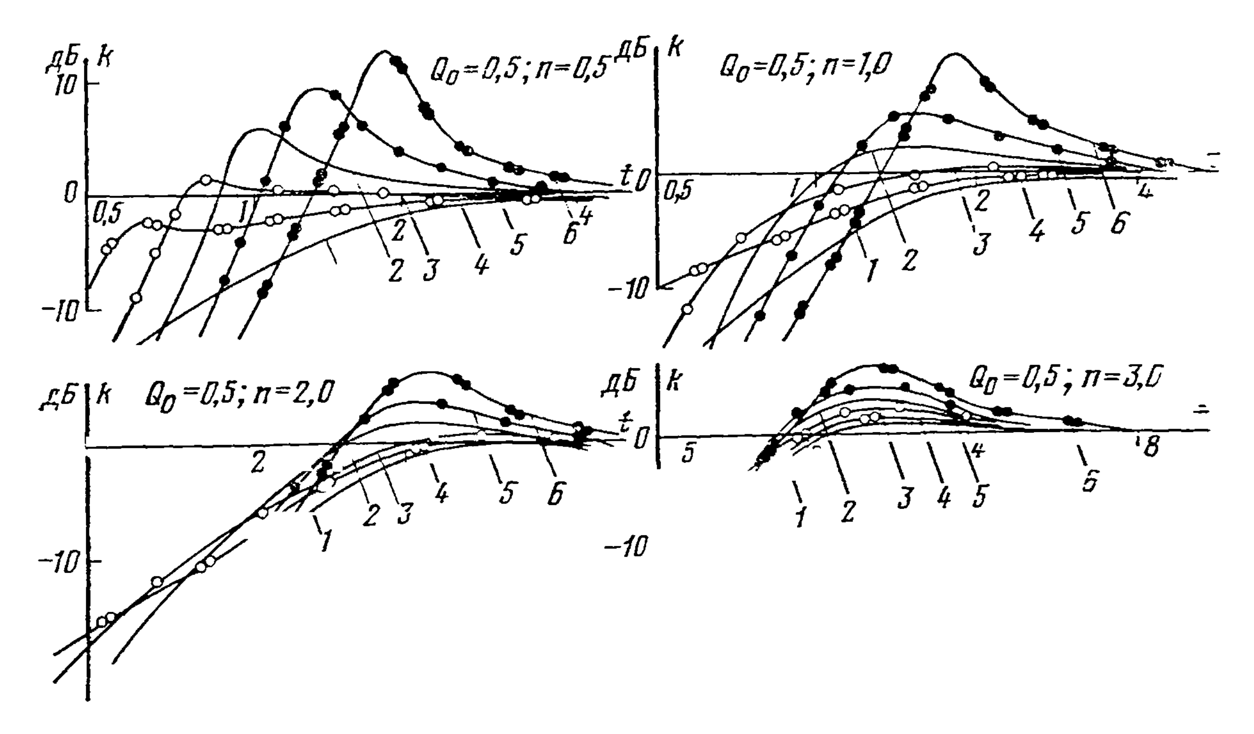


РИС 55. Семейство частотных характеристик АС с ФИ ($Q_0=0,5$)

полнен для фиксированных значений Q и n для семейства кривых с различной расстройкой фазоинвертора относительно резонансной частоты головки.

С помощью приведенных кривых могут быть решены различные задачи. Можно, например, задаться желаемой формой частотной характеристики АС и подобрать, исходя из нее, параметры головки и объем оформления. Можно по имеющейся головке и

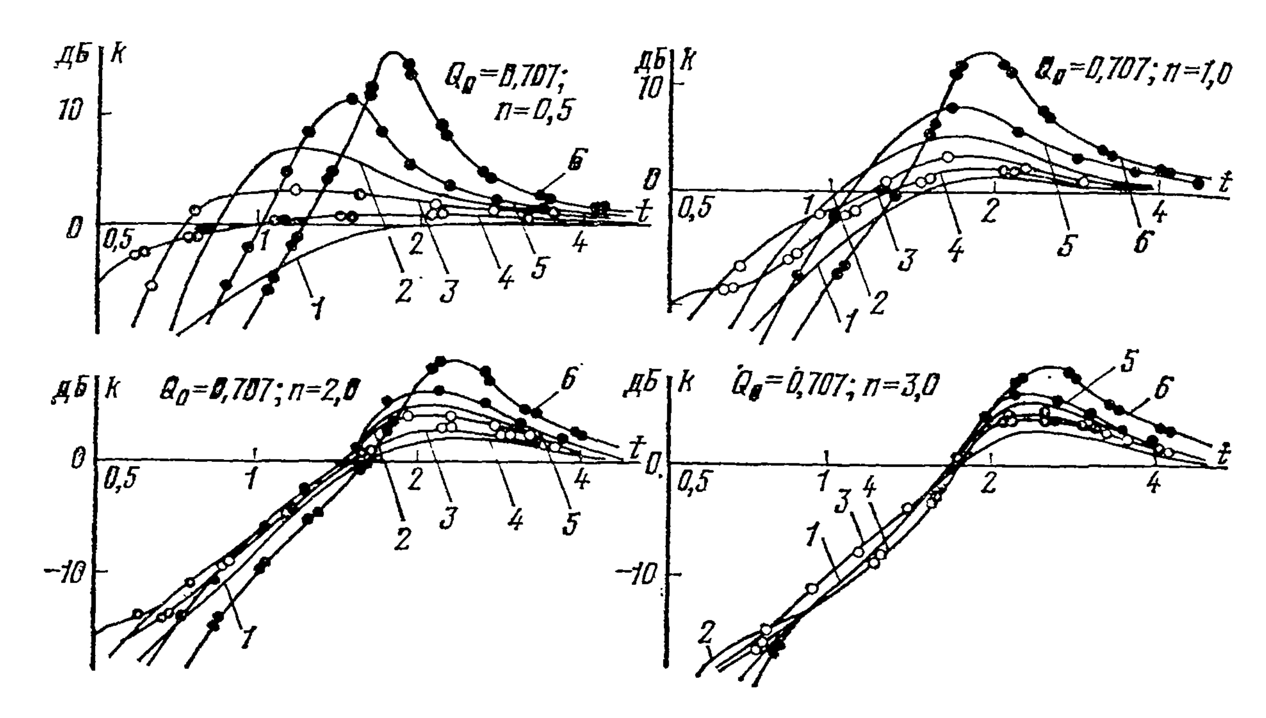


РИС. 56. Семейство частотных характеристик АС с ФИ ($Q_0=0,707$)

ориентировочному объему оформления определить целесообразность и возможность применения именно этого вида оформления. Отметим, что для более точного расчета следует пользоваться выражением (44). По этим же кривым можно определить сравнительную (с соответствующим закрытым оформлением) чувствительность АС с ФИ.

Заметим, однако, что для расчета АС с ФИ кроме знания параметров головки и оформления необходимо также уметь рассчитывать параметры трубы фазоинвертора с точки зрения допустимости активных потерь в ней.

Экспериментальные исследования авторов позволили найти эмпирическую зависимость значения активных потерь от параметров трубы (D — диаметр трубы, l — длина трубы), на основе которой получены следующие выражения:

$$l=2,34\cdot 10^3 d^2/(Vf^2_ф)-0,85D,$$

$$D=1,82\cdot 10^{-4} Vf^2_ф\left[\sqrt{1+6,15\cdot 10^5/Vf^3_ф Q_ф}+1\right],$$

где $f_ф$ — резонансная частота фазоинвертора (контура ms) определяется по z-кривым для фазоинвертора как частота провала на $\omega_ф$ между пиками на частотах ω_1 и ω_2 (см. рис. 51). По этой же

кривой можно также контролировать значения $Q_ф$. Если $Q_ф > 10$, то пики на этих кривых будут примерно одинаковы по высоте и их уровень по отношению к уровню провала будет большим. Модуль величины $Q_ф$ может быть определен численно с помощью z-кривых по выражению

$$Q_ф = \frac{f_ф}{f_0} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{Q} \left(\frac{z - z_ф}{z_ф - 1} - \frac{1}{z} \right),$$

где $\alpha = (f^2_2 - f^2_ф)(f^2_ф - f^2_1)/(f^2_1 f^2_2)$, $z = z_0/R$ (по рис. 26), $Z_ф = r/R$ (по рис. 51).

В заключение рассмотрим несколько конструкций АС с ФИ.

На рис. 57 показан внутренний вид АС объемом 90 л (780×460×250 мм). Диаметр низкочастотной головки 320 мм, диаметр трубы фазоинвертора 70 мм, его длина 100 мм. Резонансная частота 30 Гц.

На рис. 58 показан вид со стороны передней панели со снятой декоративной сеткой АС фирмы Akai (Япония) (внутренний объем 60 л, диаметр отверстия фазоинвертора 75 мм, номинальный диапазон частот 25 Гц—21 кГц).

На рис. 59 показана конструкция АС фирмы Hitachi (Япония). Кроме высокочастотной *1*, среднечастотной *2*, низкочастотной *3*, в корпусе имеется еще одна низкочастотная головка *4*, укрепленная на горизонтальной панели, причем головка непосредственно не излучает в окружающее пространство, а излучение происходит через фазоинверторное отверстие *5* на его резонансной частоте.

На рис. 60 показана большая комбинированная АС фирмы Altec Lansing (США) с фазоинверторным отверстием прямоугольной формы в нижней части корпуса. Высокочастотное звено выполнено в виде секционного рупора, низкочастотная головка, кроме того, также нагружена на рупор.

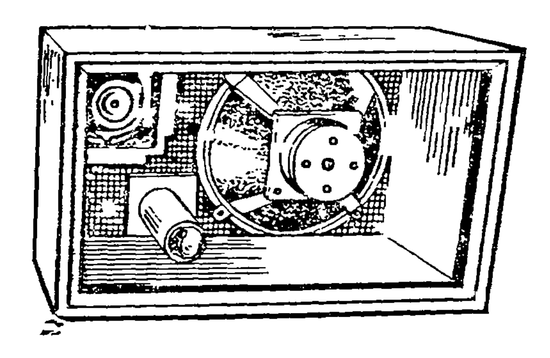


РИС. 57. Конструкция АС с ФИ (вид со снятой задней стенкой)

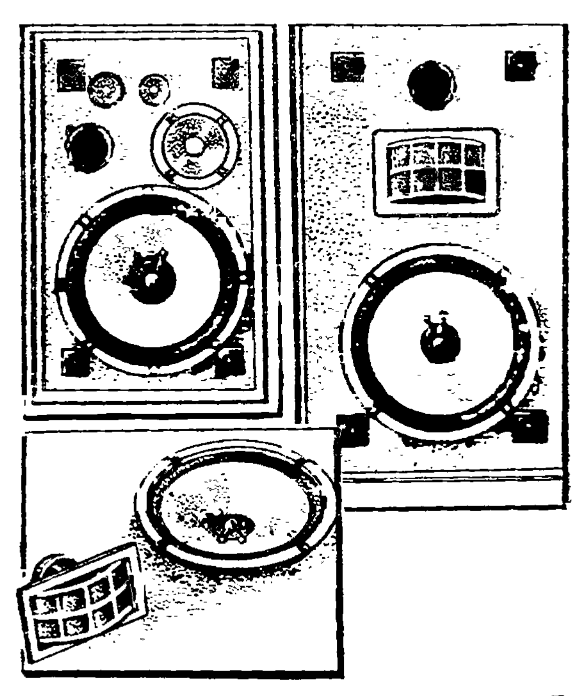
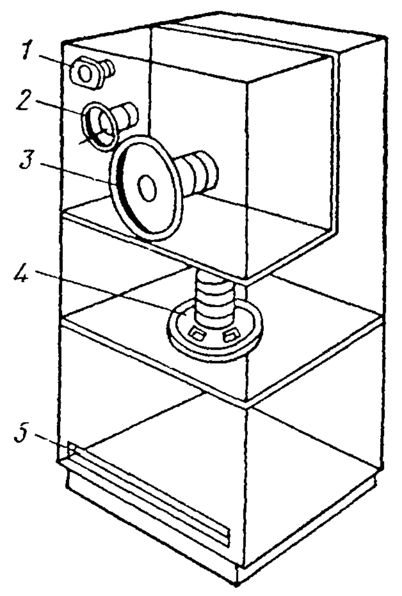
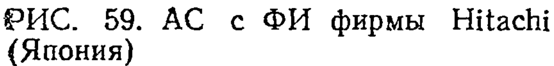
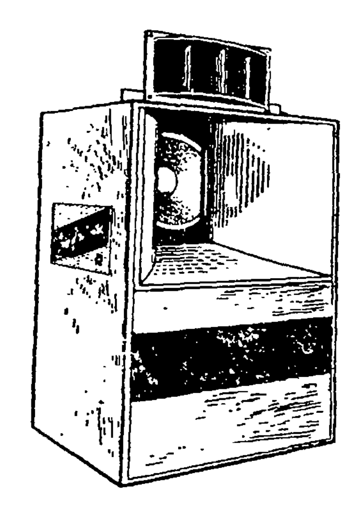


РИС. 58. Акустические системы с фазоинвертором фирмы Akai (Япония):
а — с головками прямого излучения; *б* — с рупорной головкой (высокочастотной); *в* — отдельно рупорная и низкочастотная головки




РИС. 59. АС с ФИ фирмы Hitachi (Япония)


РИС. 60. АС с ФИ фирмы Altec Lansing (США)

Пример расчета. Пусть имеется головка 50ГД-4 ($f_0=25$ Гц, $Q=0{,}3$, $V_э=150$ л, $d_{э.ф}=25$ см) и $Q_ф=20$.

Необходимо найти параметры АС с ФИ для максимально ровной частотной характеристики в области низких частот.

Рассмотрим рис. 53 для случая $Q_0=0{,}3$. Как видно, при $n=0{,}5$ получаем частотные характеристики с большой неравномерностью и, кроме того, объем оформления при этом значителен ($V=300$ л). При $n=1{,}0$, т. е. когда внутренний объем оформления равен 150 л, кривые наиболее приемлемые, но необходимо еще сделать выбор относительно настройки ФИ. Можно выбрать кривую, соответствующую настройке ФИ на частоту на 1/3 октавы ниже резонансной частоты головки, т. е. на 20 Гц. Частотная характеристика АС в этом случае равномерно понижается в область низких частот со спадом 3—4 дБ до частоты $0{,}8f_0$. При необходимости расширить частотную характеристику в область более низких частот следует выбрать кривую, соответствующую настройке ФИ на частоту на 2/3 ниже резонансной частоты головки, т. е. на частоту 16 Гц. В этом случае частотная характеристика равномерно понижается со спадом 7—8 дБ до частоты $0{,}65f_0$. Эти две кривые наиболее приемлемы. Можно рассмотреть кривые при $n=2$, т. е. когда внутренний объем равен 75 л, но полученные результаты будут значительно скромнее.

Итак, выбираем кривую, которая соответствует АС с ФИ со следующими параметрами: $f_ф=20$ Гц, $V=150$ л.

Далее определим параметры трубы фазоинвертора:

$$D=1{,}82\cdot10^{-4}\cdot150\cdot10^{-3}\cdot20^2[\sqrt{1+6{,}15\cdot10^5/(150\cdot10^{-3}\cdot20^3\cdot20)}+1]=$$
$$=6{,}72\cdot10^{-2}=6{,}7 \text{ см},$$

$$l=2{,}34\cdot10^3\cdot6{,}73\cdot10^{-4}/(150\cdot10^{-3}\cdot20^2)-0{,}85\cdot6{,}73\cdot10^{-2}=$$
$$=12\cdot10^{-2}=12 \text{ см}.$$

Проверим, не превышает ли длина трубы фазоинвертора конструктивно допустимого значения.

Если принять внутренние размеры оформления равными $0{,}8\times\times0{,}5\times0{,}37$ м^3, то видно, что длина трубы не превышает конструктивно-допустимого значения. По критерию $l<\lambda_н/12$ длина трубы также допустима, так как в рассмотренном случае $\lambda_н/12=1{,}42$ м.

АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ПАССИВНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Одна из разновидностей фазоинверсной АС—АС с ПИ. Она отличается от закрытой АС наличием дополнительной подвижной системы (в простейшем случае — подвижной системы низкочастотной головки без катушки и магнитной цепи) (рис. 61). Эта система пассивная и возбуждается колебаниями воздуха в закрытом корпусе при работе головки, излучая звуковые волны в области низких частот. В результате суммарное звуковое давление, развиваемое АС с ПИ на низких частотах, может быть значительно больше, чем закрытой АС равного объема и с той же низкочастотной головкой. Конструкция АС с ПИ приведена на рис. 62.

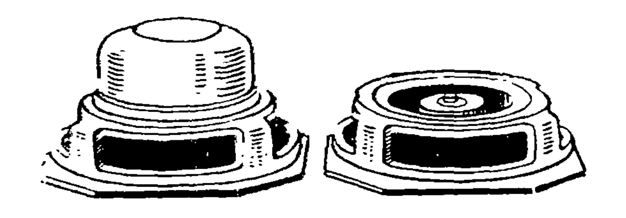


РИС. 61. Головка прямого излучения (*а*) и пассивный излучатель (*б*)

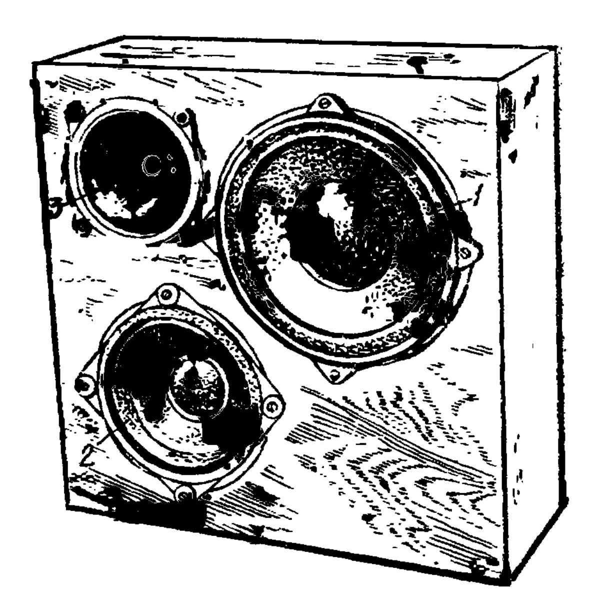


РИС. 62. Конструкция АС с ПИ:
1 — пассивный излучатель; *2* — низкочастотная головка; *3* — высокочастотная головка

По принципу действия АС с ПИ сходна с АС с ФИ. Единственное различие состоит в том, что масса воздуха в трубе фазоинвертора заменена массой подвижной системы пассивного излучателя. Изменяя массу подвижной системы пассивного излучателя, можно значительно проще изменять его резонансную частоту по сравнению с фазоинвертором, где для этого приходилось менять размеры отверстия, диаметр или длину трубы.

Ранее отмечалось, что АС с ФИ имеет ряд конструктивных ограничений. Так, при настройке фазоинвертора на низкую резонансную частоту (30—50 Гц) масса воздуха в трубе должна быть достаточно большой, что обычно обеспечивается либо увеличением ее длины, либо уменьшением диаметра (при неизменном внутреннем объеме). В первом случае может получиться, что труба конструктивно не поместится в оформление, либо ее длина превысит критическое значение $\lambda_н/12$. Во втором случае могут резко возрасти акустические потери на трение в трубе, что снизит эффективность АС с ФИ в области низких частот.

Акустические системы с ПИ свободны от этих недостатков. Действительно, как на площадь пассивного излучателя, которая обычно выбирается равной площади диффузора головки и даже больше, так и на его массу не накладывается никаких ограничений. Поэтому при расчете этих систем можно не опасаться тех трудностей, которые возникают при применении АС с ФИ. Настройка пассивного излучателя практически на любую частоту резонанса $f_п$ его массой m и гибкостью объема воздуха $S_в$ не вызывает затруднений. Это видно из следующего выражения:

$$f_п = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{S_в + S_0}{m}}. \qquad (46)$$

Следует однако отметить, что собственно пассивный излучатель характеризуется не только массой, но также и гибкостью подвеса s, так что АС с ПИ является более сложной колебательной системой, чем АС с ФИ, что, естественно, усложняет ее расчет.

Принцип использования пассивных излучателей для повышения уровня звукового давления известен давно, однако практические конструкции АС с ПИ стали появляться лишь в 70-х годах. Можно отметить конструкции АС с ПИ, выпускаемые фирмами Kenwood (Япония), Selection (Англия), Ohm (США). Как следует из табл. 1, в настоящее время выпуск этих систем приближается к 10% в развитых капиталистических странах. В нашей стране также начали выпускать такие АС.

При расчете АС с ПИ так же как в АС с ФИ целесообразно находить не абсолютное значение звукового давления, а его значение по сравнению со звуковым давлением соответствующей закрытой системы. Это позволяет определить тот выигрыш, который обеспечивает АС с ПИ по сравнению с закрытой системой.

Тогда по аналогии с (40) имеем

$$\frac{p_п}{p_з} = \frac{\dot{x}_г}{\dot{x}_0}\sqrt{\frac{r_{sп}}{r_{s0}}} = k\sqrt{\frac{r_{sп}}{r_{s0}}}, \qquad (47)$$

где $r_{sп} = r_{s1} + r_{s2}$.

Здесь введены обозначения, аналогичные примененным при рассмотрении АС с ФИ.

В основу расчета АС с ПИ по выражению (46) может быть положена схема акустического аналога АС с ПИ, изображенная

на рис. 63. Здесь r_0 — активные потери в головке, r — активные потери в пассивном излучателе.

Поскольку АС с ПИ так же, как и АС с ФИ может быть рассмотрена как система из двух излучателей, один из которых — собственно низкочастотная головка, а другой — пассивный излучатель, то расчет выражения $\sqrt{r_{sп}/r_{s0}}$ для пассивного излучателя ничем не отличается от его расчета для фазоинвертора. Единственное отличие состоит в том, что площадь пассивного излучателя может быть выбрана значительно большей, чем площадь отверстия фазоинвертора. Расчеты авторов показали, что для АС с ПИ значение $\sqrt{r_{sп}/r_{s0}}$ может составлять от 2,0 до 2,35 и оно частотно-малозависимо.

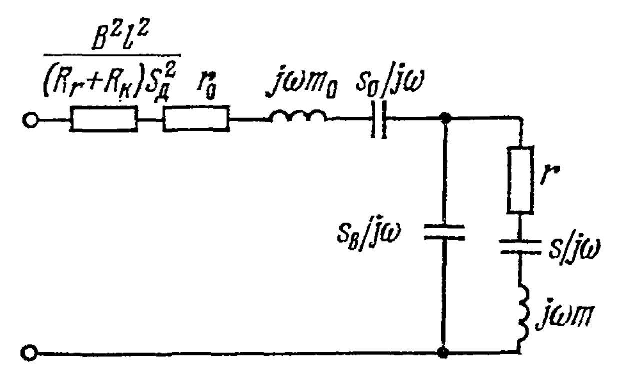


РИС. 63. Упрощенная схема акустического аналога АС с ПИ

Выражение для p_0 закрытого оформления подставляем в (47) в виде (42).

Вывод выражения для $k=\dot{x}_п/\dot{x}_0$ приведен в приложении 5. Здесь приводится лишь окончательное выражение:

$$|k|=\sqrt{\frac{\left[1-QQ_п\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)\left(\frac{t^2l^2-1}{tl}\right)\right]^2+\left[Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)+Q_п\left(\frac{t^2l^2-1}{tl}\right)\right]^2}{\left\{1+QQ_п\left[\frac{n}{t}\left(\frac{t^2l^2-1}{tl}\right)-\left(t-\frac{1}{t}\right)\left(\frac{t^2l^2-p-1}{tl}\right)\right]\right\}^2+\left[Q_п\left(\frac{t^2l^2-1}{tl}\right)+Q\left(\frac{t^2-n-1}{tl}\right)\right]^2}}. \quad (48)$$

Выражение для звукового давления АС с ПИ ($p_п$) с учетом (47), (42) и (48) может быть записано как

$$p_п=(2{,}0\div 2{,}35)\,Ak\frac{t}{\sqrt{\frac{1}{Q^2}+\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)^2}}, \quad (49)$$

где A — частотно-независимый множитель.

Как видно из (49), поведение АС с ПИ может быть описано пятью параметрами: n, l, p, Q, $Q_п$. Здесь кроме параметров, описывающих АС с ФИ, появился параметр $p=s_в/s$, характеризующий относительную упругость (подвеса) пассивного излучателя, т. е. отношение упругости воздуха внутри оформления к упругости

подвеса пассивного излучателя. Добротность фазоинвертора $Q_п$ заменяется здесь добротностью пассивного излучателя, равной $Q_п = \omega_п m / r_п$.

Исследования авторов показали, что число переменных можно сократить до четырех, так как значение $Q_п$ может быть выбрано фиксированным и в диапазоне $Q_п > 5$ практически не влияет на полученные результаты.

Таким образом, характеристики АС с ПИ зависят от добротности головки, объема оформления, настройки пассивного излучателя и упругости его подвеса, при условии поддержания добротности пассивного излучателя $Q_п > 5$.

Выражение (49) довольно громоздко. Поэтому на рис. 64—66 приводятся наборы графических зависимостей (семейства частотных характеристик), построенных по выражению (48). Каждый

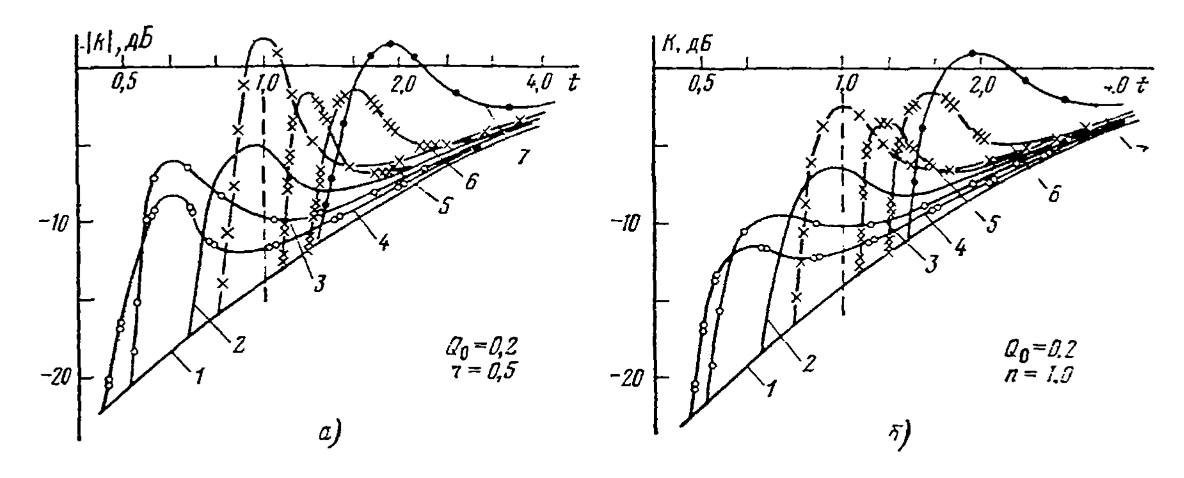


РИС. 64. Семейство частотных характеристик АС с ПИ для $Q_0=0,2$, $n=0,5$ (*а*) и $Q_0=0,2$, $n=1,0$ (*б*)

Здесь и на рис. 65, 66 нанесены следующие кривые:
——— — закрытое оформление; —·—·—·— $p=1$, $l=2$; —×××—×××— $p=1$ $l=1$; —××—×× $p=1$, $l=0,5$; —×—×— $p=2$, $l=3$; ———— $p=2$, $l=2$; O—O—O— $p=3$, $l=3$; OO—OO—OO— $p=3$ $l=2$

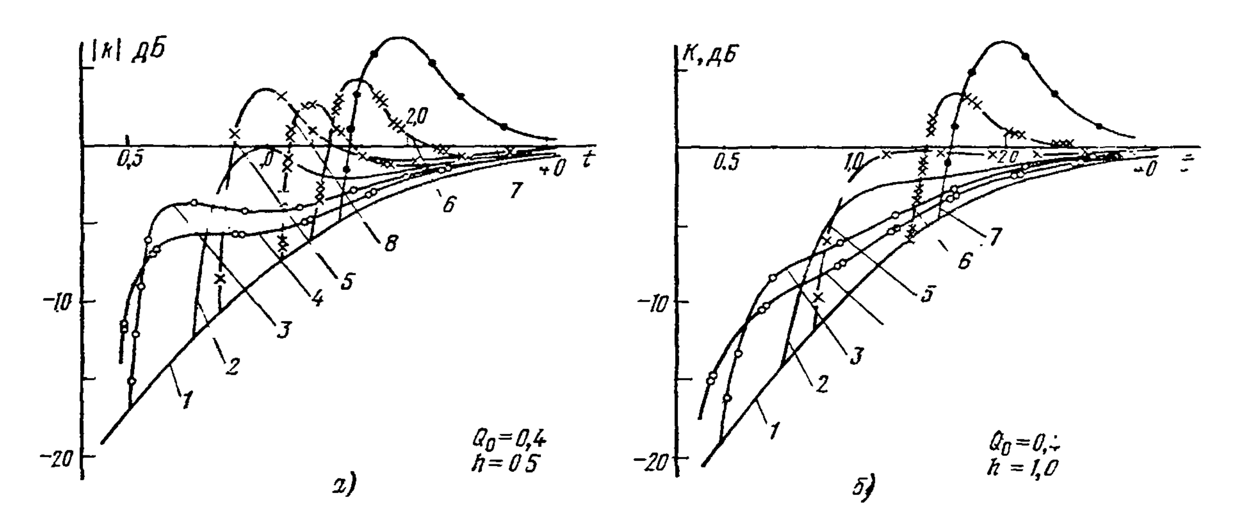


РИС. 65. Семейство частотных характеристик АС с ПИ для $Q_0=0,4$, $n=0,5$ (*а*) и $Q_0=0,4$, $n=1,0$ (*б*)

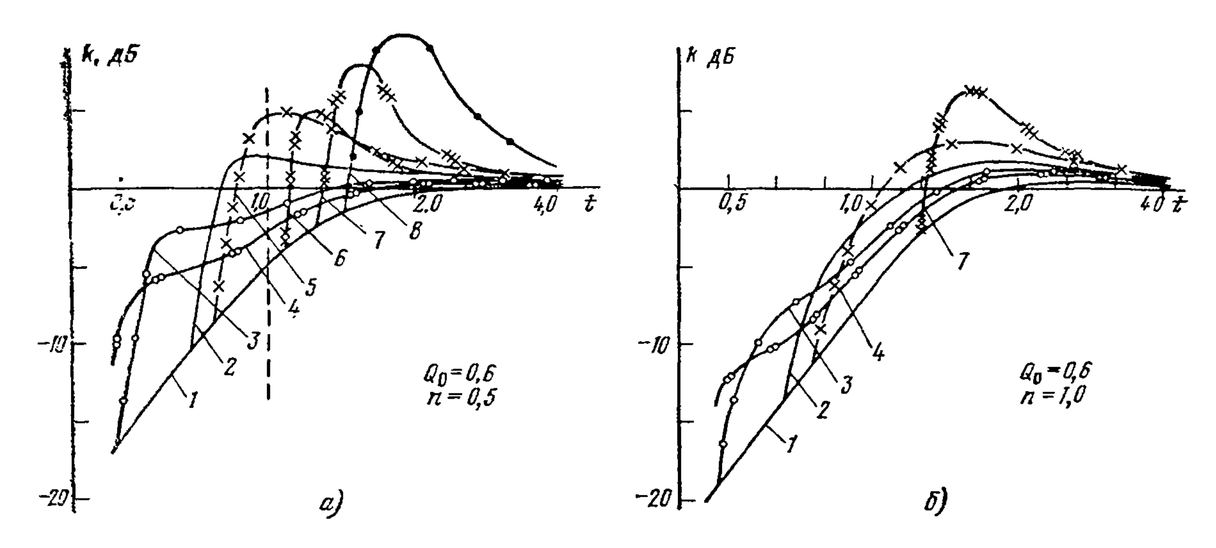


РИС. 66. Семейство частотных характеристик АС с ПИ для $Q_0=0{,}6$, $n=0{,}5$ (*а*) и $Q_0=0{,}6$, $n=1{,}0$ (*б*)

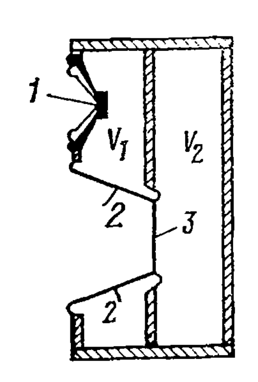
рисунок выполнен для фиксированных значений Q, $Q_п$, n для семейства кривых с различными значениями настройки пассивного излучателя и относительными упругостями его подвеса.

Как видно из приведенных кривых, обычно пассивный излучатель настраивается на частоту в 2—3 раза ниже резонансной частоты головки в отличие от настройки фазоинвертора, резонансная частота которого может лишь незначительно отличаться от резонансной частоты головки. Что касается добротности используемых головок, то их значение составляет 0,2—0,8 и связано с объемом оформления. Чем меньше объем оформлений, тем меньшую добротность головки необходимо выбирать.

С помощью приведенных кривых могут быть решены различные задачи. Например, задавшись желательной формой частотной характеристики, типом головки и предположительным объемом оформления, выбирают параметры пассивного излучателя (его массу и гибкость). Если желаемая форма частотной характеристики не получается, наиболее просто увеличивать объем оформления. Однако могут возникнуть такие сочетания добротности головки и объема оформления, при которых получить желательную форму частотной характеристики затруднительно.

В качестве примера рассмотрим двухполосную систему 10АС-10 с пассивным излучателем, изображенную на рис. 62. В ней в качестве низкочастотного звена *2* использована головка 10ГД-34 ⌀=105 мм, а в качестве высокочастотного *3* — головка 3ГД-31. Передняя панель квадратная (315×315 мм). Корпус имеет малую глубину (125 мм). Конструкция пассивного излучателя *1* представляет собой диффузор конусной головки (⌀ 140 мм) с добавочной массой. Резонансная частота головки 54 Гц, резонансная частота пассивного излучателя — 15 Гц.

Заметим, что делают попытки повысить эффективность работы АС с ПИ. На рис. 67 изображена такая АС с ПИ. В этой системе имеется два закрытых объема V_1 и V_2. Головка *1* возбуж-



дает объем V_1, а пассивный излучатель частью 2 возбуждает объем V_1, а частью 3 — объем V_2, который полностью заполнен звукопоглощающим материалом. Благодаря наличию объема V_2 и связи с ним пассивного излучателя снижается резонансная частота АС с ПИ и улучшается форма ее частотной характеристики.

РИС. 67. Схематическое изображение сложной АС с ПИ

Пример расчета. Пусть имеется головка 30ГД-1 с параметрами: $f_0=25$ Гц, $Q=0,2$, $V_э=160$ л. Необходимо найти параметры АС с ПИ для случая максимально ровной частотной характеристики системы в области низких частот.

Рассмотрим рис. 64,*а*, 65,*а* и 66,*а*, справедливые для $Q=0,2$. Как видно, наилучшие результаты могут быть получены при $n=2$ (рис. 65,*а*). При этом внутренний объем оформления будет равен 80 л. Теперь выбираем частоту настройки и гибкость подвеса пассивного излучателя. Предпочтение следует отдавать кривым с параметрами $l=2$, $p=2$ и $l=2$, $p=3$. Характеристика при $p=2$ получается наиболее протяженной в область низких частот, спад плавный, но достигающий ~9 дБ на частоте 23 Гц. Выигрыш по звуковому давлению составляет 6 дБ. Спад характеристики при $l=2$, $p=3$ также плавный, но составляет ~7 дБ до частоты 25 Гц. Выигрыш по звуковому давлению 7 дБ.

Каковы же параметры АС с ПИ? Пассивный излучатель в обеих случаях настраивается на частоту в 2 раза ниже резонансной частоты головки ($l=2$), т. е. на 22,5 Гц. Относительная упругость подвеса ПИ равна соответственно $p=2$ и $p=3$, т. е. $s=s_в/2$ и $s=s_в/3$. Иными словами, эквивалентный объем излучателя $V_{э.п}$ (понятие аналогичное понятию — эквивалентный объем головки) при $p=2$ равен эквивалентному объему головки $V_э$, т. е. 160 л, а при $p=3$ равен $3/2V_э$, т. е. 240 л.

Площадь ПИ выбирается равной площади диффузора головки, а масса определяется из (46) и должна быть такой, чтобы с упругостью ($s_в+s$) обеспечить резонансную частоту ПИ 22,5 Гц. Добротность излучателя должна быть больше 5.

ДРУГИЕ ВИДЫ АКУСТИЧЕСКОГО ОФОРМЛЕНИЯ ГОЛОВОК

В предыдущих главах рассматривались наиболее часто применяемые виды АС. Однако существует еще целый ряд видов систем, применяемых значительно реже. Здесь будут рассмотрены: акустический лабиринт, рупорная акустическая система, электростатическая акустическая система, а также акустическая система с электромеханической обратной связью (ЭМОС).

Для того чтобы избежать акустического «короткого замыкания», можно использовать акустическое оформление с лабиринтом. Один из вариантов конструкции этого вида оформления фирмы Akai (Япония) приведен на рис. 68. Акустическая система состоит из корпуса, на передней стороне которого укреплена головка *1*. Задняя сторона диффузора головки работает на образо-

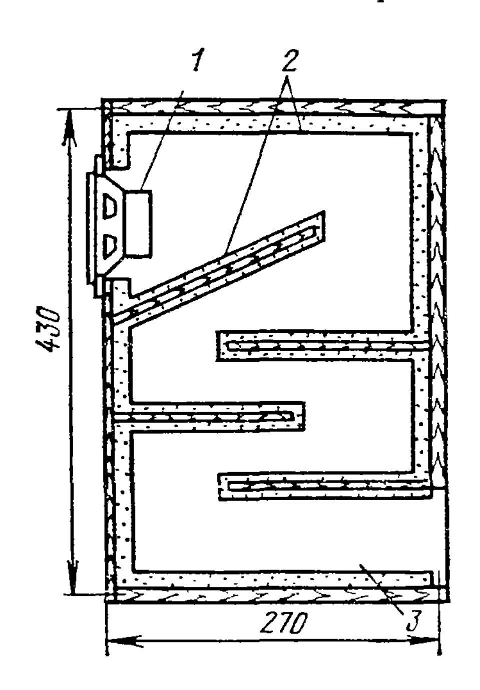


РИС. 68. Лабиринт фирмы Akai в разрезе

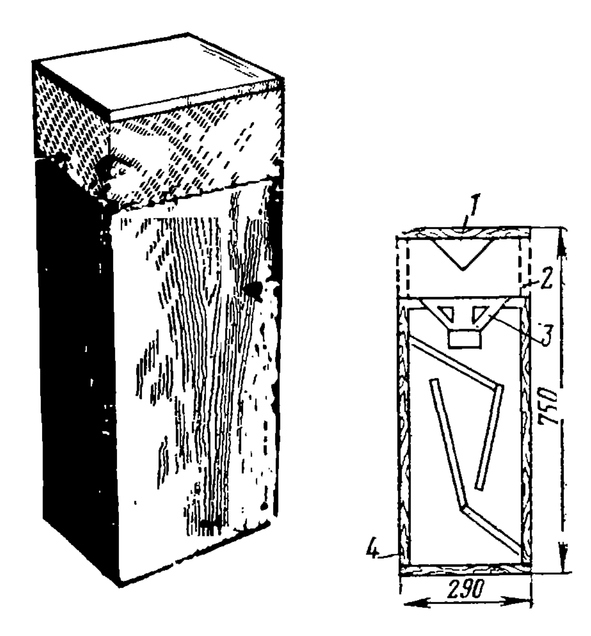


РИС. 69. Внешний вид (*а*) и разрез (*б*) радиального комнатного лабиринта

ванный рядом перегородок *2* зигзагообразный звукопровод — лабиринт. Второй конец лабиринта заканчивается выходным отверстием *3* на одной из стенок корпуса. Поперечное сечение лабиринта — обычно прямоугольное или круглое, площадь которого равна эффективной площади диффузора головки $S_{эфф}$. Выпрямленная длина лабиринта должна быть равна 1/2λ на нижней граничной частоте воспроизводимого диапазона частот. Благодаря этому излучение из выходного отверстия лабиринта будет совпадать по фазе с излучением передней стороной диффузора головки. Так, если нижняя граничная частота воспроизводимого диапазона 30 Гц (длины волны 11,4 м), то выпрямленная длина трубы лабиринта должна быть 5,7 м. Конечно, если лабиринт будет иметь больше колен, конструктивная глубина корпуса АС будет соответственно меньше. Для уменьшения влияния на частотную характеристику системы частных (высших) резонансов трубы ее стены желательно покрывать звукопоглощающим материалом, например, слабо набитыми и простеганными ватными матами. Однако конструкции АС с лабиринтом тем не менее довольно громоздки, вследствие чего редко применяются, несмотря на то, что от них можно получить хорошие результаты.

На рис. 69 показан разрез другой конструкции с лабиринтом. Здесь над головкой *3* укреплен рассеиватель *1* для излучения звука в горизонтальной плоскости. Звук излучается через отверстия *2* и *4*.

Электродинамическая головка может быть нагружена на рупор. Известны две модификации устройства рупорных головок. В первой из них, так называемой широкогорлой, горло рупора непосредственно примыкает к диффузору головки. За счет того, что устье имеет диаметр больше диаметра диффузора головки, направленность такого рупора острее направленности головки. Поэтому звуковая энергия концентрируется на оси рупора и звуковое давление здесь возрастает.

Во второй модификации (узкогорлой) рупор сочленяется с диафрагмой (диффузором) головки через предрупорную камеру, играющую роль, аналогичную роли электрического согласующего трансформатора. Здесь согласуются механические сопротивления подвижной системы головки и горла рупора, что увеличивает нагрузку на диафрагму и как бы повышает ее сопротивление излучения, благодаря чему сильно повышается коэффициент полезного действия. Таким образом, это дает возможность получить большое звуковое давление.

Имеется много различных типов рупоров, но практически наиболее часто применяют в бытовой аппаратуре экспоненциальный рупор, сечение которого изменяется по закону

$$S = S_0 e^{\beta x}, \qquad (50)$$

где S_0 — площадь входного отверстия рупора, β — показатель экспоненты.

На рис. 70 приведены различные профили рупоров.

Как можно вывести из выражения (50), поперечное сечение такого рупора увеличивается на одинаковое процентное значение через каждую единицу его осевой длины. Значение этого процентного приращения определяет нижнюю граничную частоту рупора. На рис. 71 представлена зависимость процентного приращения поперечного сечения на 1 см осевой длины от нижней граничной частоты. Так, например, чтобы обеспечить воспроизведение рупором нижней граничной частоты 60 Гц, площадь поперечного сечения должна увеличиваться на 2% через каждый 1 см его осевой длины. Эту зависимость можно представить и в виде следующего выражения:

$$f_{гр.н} = 6{,}25 \cdot 10^3 \lg (0{,}01\,k + 1),$$

где k — приращение площади поперечного сечения, %.

Для низких частот (до 500 Гц) это выражение упрощается и принимает вид $f_{гр.н} = 27k$.

Если рупор делается квадратного или круглого сечения, то сторона квадрата или диаметр круга должны увеличиваться на каждый 1 см длины рупора на $\sqrt{k}$ процентов. Если же его делают прямоугольного сечения с постоянной высотой, то ширина се-

чения рупора должна увеличиваться на k процентов на каждый 1 см его длины.

Однако выдержать необходимое процентное увеличение сечения еще недостаточно для хорошего воспроизведения низких частот. Нужно иметь достаточную площадь его выходного отвер-

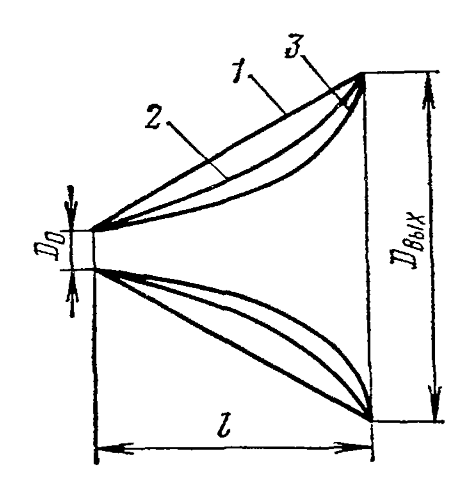


РИС. 70. Профили применяемых рупоров

1 — конический; *2* — экспоненциальный; *3* — гиперэкспоненциальный

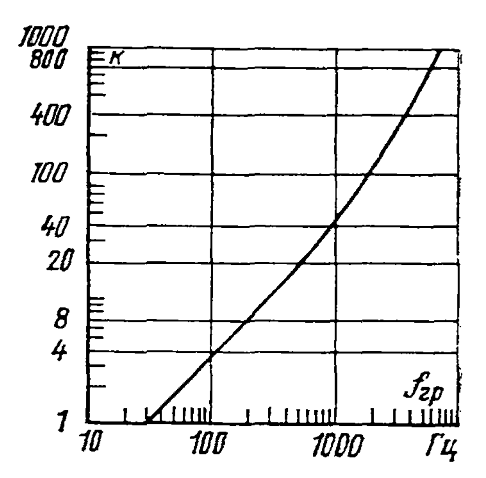


РИС. 71. Зависимость процентного приращения площади поперечного сечения рупора на 1 см его осевой длины от нижней граничной частоты

стия — устья. Его диаметр (или диаметр равновеликого круга) должен быть

$$D \geqslant \lambda_{гр.н}/\pi \approx 110/f_{гр.н}.$$

Так, для нижней граничной частоты 60 Гц диаметр устья составит около 1,8 м. Для более низких граничных частот размеры ьч будут еще больше. Кроме того, рупорная головка, хорошо производя низшие частоты (выше $f_{гр.н}$), недостаточно хорошо пэоизводит широкий частотный диапазон. Учитывая это, целесообразно иметь две рупорные головки: одну для воспроизведения зких, а другую — для высоких чат. На рис. 72 представлен внешний и сечение такой АС с двумя рупори головками и фазоинвертором для произведения частот ниже $f_{гр.н}$ руа.

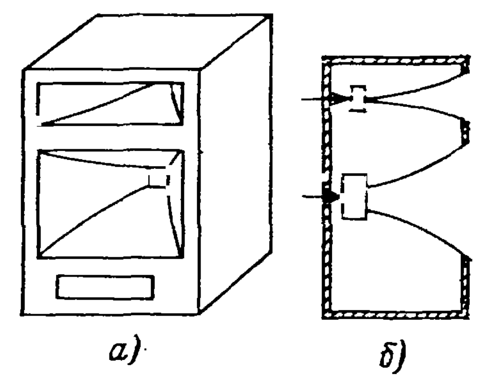


РИС. 72. Внешний вид (*а*) и разрез (*б*) акустической системы с двумя рупорными головками и фазоинвертором

Применение низкочастотных рупороформлений в жилых помещениях ограничено размерами помещения. Однако если такая возможность имеется, то расчет рупора следует начинать, задавшись площадью устья по выбранной нижней граничной частоте, уменьшая сечение на k процентов на каждый

1 см осевой длины до тех пор, пока не достигают площади сечения, равной площади диффузора головки. При этом, для того чтобы сопрячь головку с широкогорлым рупором, рупор должен иметь сечение той же формы, т. е. круглое или эллиптическое. Для узкогорлых рупоров идентичность формы сечения и диафрагмы головки необязательна, так как горло и диафрагма сочленяются через предрупорную камеру. Отметим, что высота камеры должна быть существенно больше амплитуды колебаний подвижной системы головки во избежание возникновения сильных нелинейных искажений из-за несимметричности деформации объема воздуха в камере. Однако слишком большая высота предрупорной камеры ухудшает воспроизведение высоких частот.

Иногда, чтобы уменьшить габаритные размеры АС, применяют свернутые рупоры, различные конструкции которых показаны на рис. 73. Свернутые рупоры рассчитывают практически так же, как и обычные. При расчете профиля необходимо следить за тем, чтобы в местах перехода (сгиба колен) не было резких изменений сечений, вызывающих нерегулярности в частотной характеристике.

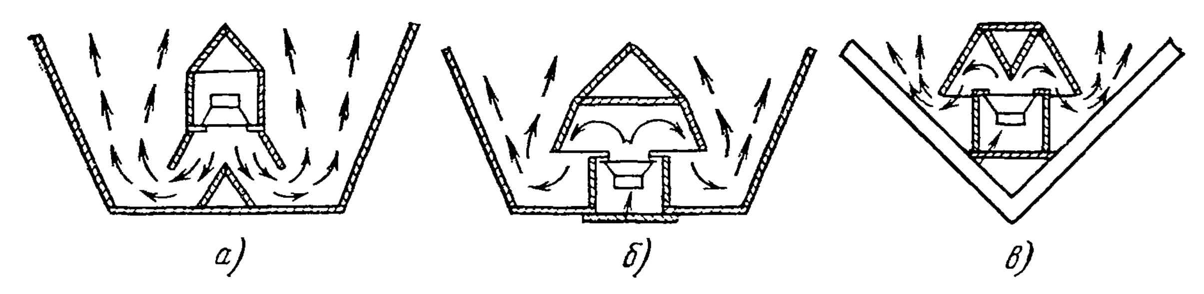


РИС. 73. Конструкции свернутых рупоров

Ранее описывалось устройство электростатической головки и отмечалось, что такие головки используют преимущественно только как высокочастотные из-за целого ряда сложностей, возникающих при конструировании низкочастотных электростатических го-

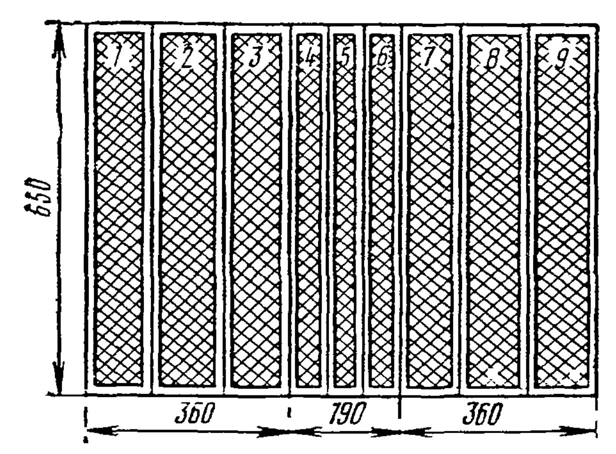


РИС. 74. Изображение широкополосной электростатической акустической системы ГСШ-1

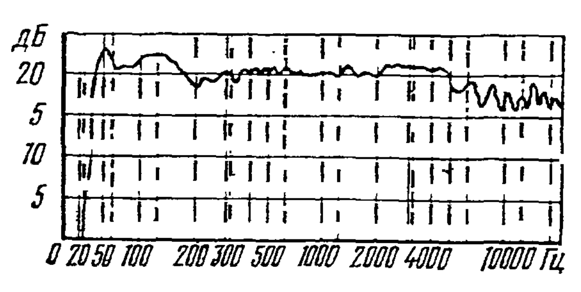


РИС. 75. Частотная характеристика ГСШ-1

ловок. Здесь описывается конструкция и устройство первой отечественной широкополосной головки (системы) ГСШ-1. Устройство (рис. 74) выполнено в виде плоской конструкции и состоит из шести односекционных низкочастотных панелей (*1—3*, *7—9*) и одной трехсекционной — средних и высоких частот, причем секции *4*, *6* воспроизводят только средние частоты, а секция *5* — средние и высокие. Чувствительность системы зависит от площади поверхности головки и от площади отверстий в электродах. Зазор мембрана-электрод на низкочастотных панелях достигает 2 мм. Для мембраны применяется алюминированная пленка из полиэтилентерефталата толщиной 6 мкм. Панели излучателей монтируются на деревянную раму, в нижней части которой устанавливаются элементы блока питания.

На рис. 75 представлена частотная характеристика этой электростатической системы. Ее основные технические параметры следующие:

Мощность	20 Вт
Номинальное электрическое сопротивление на частоте 1000 Гц	8 Ом
Номинальный диапазон частот	40 Гц — 30 кГц
Среднее стандартное звуковое давление	0,25 Па
Неравномерность частотной характеристики	8 дБ
Суммарный коэффициент гармоник искажений . . .	1%
Габаритные размеры	87×69×60 см^3

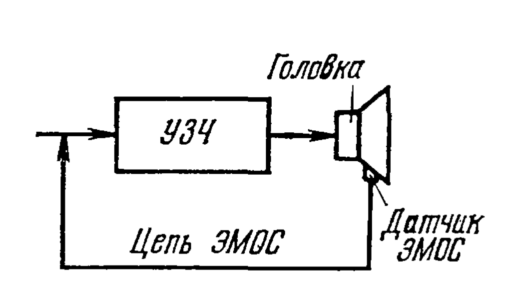
Принцип использования электромеханической обратной связи (ЭМОС) для улучшения частотных характеристик АС известен давно. Однако так же, как и к АС ПИ, практический интерес к этим системам пробудился всего несколько лет назад (конструкции фирм Philips, Matsushita, Голландия, Япония).

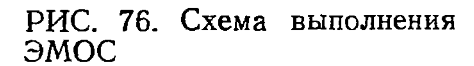
В АС с ЭМОС используется отрицательная обратная связь от колебаний подвижной системы головки, ускорение которой пропорционально звуковому давлению системы. При этом э. д. с., создаваемая за счет колебаний подвижной системы (рис. 76), подается на вход усилителя в противофазе со входным напряжением. С помощью ЭМОС возможно решить две задачи: расширить воспроизводимый диапазон частот в более низкочастотную область и уменьшить коэффициент гармоник в области низких частот.

На рис. 77 приведены типичные частотные характеристики АС без ЭМОС (*1*) и с ЭМОС (*2*). Как видно, частотная характеристика АС расширяется в сторону более низких частот (в данном примере со 100 до 32 Гц). Однако введение ЭМОС понижает уровень звукового давления (в данном примере на 10 дБ). Поэтому, чтобы получить прежний уровень звукового давления, необходимо увеличить мощность оконечного усилителя.

На практике применяют комбинированную ЭМОС по колебательной скорости и колебательному ускорению, которая может быть получена двумя способами. Первый способ прост и не требует каких-либо изменений в конструкции головки. Сигнал для получения ЭМОС снимается непосредственно со звуковой катушки головки. Для выделения этого сигнала применяются мостовые

схемы. На выходе моста создается напряжение, пропорциональное скорости подвижной системы головки, которое затем дифференцируется, чтобы получить сигнал, пропорциональный ускорению и оба напряжения подаются на вход усилителя. Недостаток этого способа — трудность балансировки моста в достаточно широком диапазоне частот.




РИС. 76. Схема выполнения ЭМОС

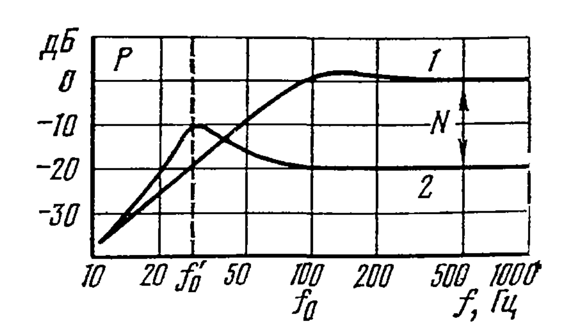


РИС. 77. Частотные характеристики АС с ЭМОС

Другой способ требует применения дополнительного датчика измерителя ускорения — акселерометра. Обычно акселерометр представляет собой пьезокерамический диск диаметром 8—12 мм и толщиной 0,5—1,0 мм. Обе его поверхности металлизированы и каждая имеет отвод. На наружную поверхность прикреплен (наклеен) грузик массой в несколько граммов. Датчик закрывается защитным кожухом. С помощью датчика снимается сигнал, пропорциональный ускорению подвижной системы головки, т. е. пропорциональный звуковому давлению. Этот сигнал после коррекции подается на вход усилителя.

Такой способ получения ЭМОС более сложен, но способен обеспечить достаточное высокие технические характеристики АС. Примером АС с ЭМОС является электрофон 22RH 532 фирмы Philips, в низкочастотной головке которого применена ЭМОС. Резонансная частота низкочастотной головки без ЭМОС равна 80 Гц. Объем закрытого оформления составляет 15 л. Частотная характеристика этой АС имеет неравномерность 5 дБ и простирается от 30 Гц.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для получения требуемых результатов от акустических систем необходимо не только правильно рассчитать их, но и тщательно изготовить. Здесь даются рекомендации, которые позволят избежать наиболее часто встречающихся ошибок

В любом акустическом оформлении прежде всего следует избегать каких-либо щелей или отверстий (за исключением щелей

или отверстий в задней стенке у открытого оформления). Особенно опасны они на передней панели, поскольку в этом случае имеет место акустическое «короткое замыкание» и оформление практически не работает, что приводит к резкому ухудшению воспроизведения низких частот. Поэтому, в частности, рекомендуется устанавливать головки на передней панели с уплотнением в виде кольцевой прокладки из микропористой или губчатой резины, резиновой трубки, пенопласта ПХВЭ и т. д. Этим достигается и другая цель — снижение уровня вибраций панели при работе головки. Уплотнением могут служить и картонные дужки (сектора) у головок малых мощностей, которые расположены на диффузородержателе. Но тогда необходимо уплотнять щели между ними.

Головки обычно крепят к оформлению с помощью винтов, шурупов или специальных шпилек. Необходимо следить, чтобы головки притягивались к корпусу не очень сильно, так как это может покоробить диффузородержатель и тем самым вызвать перекос подвижной системы. Задняя сторона диффузора головки не должна быть закрыта деталями (при конструировании открытого акустического оформления магнитофонов, радиоприемников и т. д.). Можно рекомендовать, чтобы детали АС не занимали более 25—30% внутреннего объема оформления. Несоблюдение этого требования приводит к снижению звукового давления, развиваемого АС. Материал оформления должен обеспечивать жесткость стенок, особенно передней. Наиболее подходящим материалом являются деревянные доски, фанера, древесноволокнистые и древесностружечные плиты. При этом, чем больше размер корпуса, больше мощность головки, тем более толстый материал оформления должен быть применен. Так, для высококачественных АС объемом 50—100 л следует делать стенки толщиной не менее 20 мм, особенно переднюю панель оформления, к которой крепятся головки.

Акустическое оформление рассчитывают, исходя из габаритных размеров низкочастотных или широкополосных головок. Высокочастотные и среднечастотные головки могут быть помещены в общее акустическое оформление с низкочастотными, но отделены от них акустически (выделены в отдельный отсек или закрыты сзади специальными колпаками). Диаметр отверстия для головки должен быть равен полному диаметру диффузора, включая и гофр, чтобы исключить возможность касания гофра стенок оформления при колебаниях подвижной системы головки. Диффузор головки необходимо защитить от возможного внешнего механического повреждения, прикрыв отверстие под декоративной тканью металлической или пластмассовой сеткой со стороной ячейки 5—8 мм. Облицовочные и декоративные элементы часто оказывают отрицательное влияние на частотную характеристику головки. Плотная ткань ухудшает звуковоспроизведение в области средних и высоких частот. Значительное влияние может оказать декоративный материал, закрывающий отверстие фазоинвертора. Толстые решетки и жалюзи могут иногда вызывать резонансные яв-

ления, и в частотной характеристике головки появятся дополнительные пики и провалы.

Как уже отмечалось, среднечастотная и высокочастоная головки при установке в общем оформлении с низкочастотным должны быть закрыты сзади кожухом из фанеры, пластмассы или металла. Такой кожух устраняет воздействие на высокочастотную головку излучения задней стороны диффузора низкочастотной головки. Кожух должен плотно прилегать к панели. Щели в самом кожухе и между ними и панелью недопустимы. Можно для заделки щелей проложить полосы пористой резины или поролона. При изготовлении АС с ФИ, кроме того, необходимо контролировать, чтобы труба фазоинвертора плотно входила в переднюю панель оформления, а имеющиеся щели были заделаны.

При самостоятельном изготовлении корпуса оформления трудности выполнения чистого шипового соединения панелей, особенно из древесностружечного материала, можно обойти, связывая элементы оформления при помощи деревянных брусков или металлических уголков (рис. 78). Уголки предварительно приклеивают к стенкам оформления.

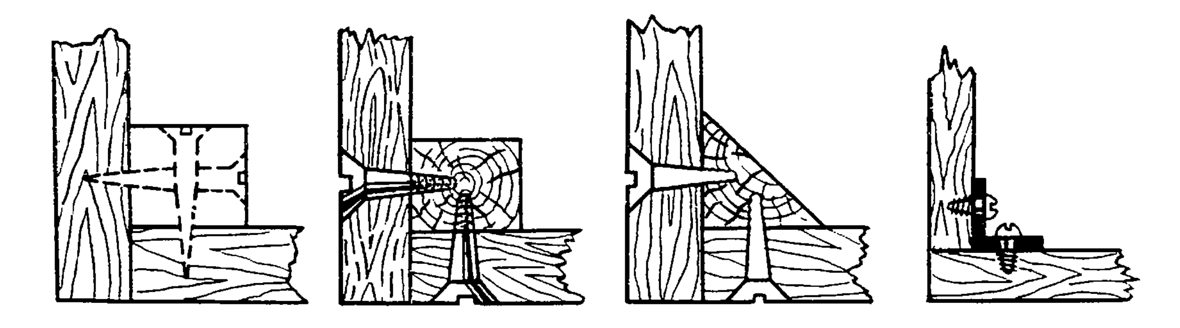


РИС. 78. Способы соединений стенок корпусов АС

Самой трудной и ответственной является отделка внешних поверхностей оформления. Наиболее красиво фанерование этих поверхностей ценными породами дерева с последующей полировкой поверхностей. Однако такая работа требует высокой квалификации. Поэтому для упрощения рекомендуется использовать фанерованные древесноволокнистые плиты. Проще же всего покрыть поверхности оформления самоклеящейся пленкой с рисунком дерева ценных пород.

Акустическое оформление должно быть изготовлено так, чтобы оно по возможности не вибрировало при работе головки. При чрезмерной вибрации корпуса снижается звуковое давление от системы и увеличивается суммарный коэффициент гармоник в области низких частот. Кроме того, вибрации порождают призвуки, искажающие основной сигнал. Для борьбы с вибрациями рекомендуется устанавливать низкочастотную головку на мягкую кольцевую прокладку. Это позволяет снизить уровень вибрации корпуса в области низких частот на 15—20 дБ. Однако при этом не-

обходимо следить, чтобы крепящие болты не соприкасались непосредственно с диффузородержателем. Для этого под головки болтов и гайки нужно подложить шайбы из мягкой резины.

Одним из основных способов борьбы с вибрацией корпусов является увеличение толщины их стенок. Наибольшая разница в уровнях вибрации наблюдается при изменении толщины стенок от 4 до 8 мм. Средний уровень ускорений на низких частотах при этом уменьшается на 40—45 дБ, а при увеличении же толщины стенок от 14 до 20 мм уменьшение составляет 5 дБ. Таким образом, существует такая предельная толщина стенок, при которой дальнейшее их увеличение практически не влияет на характер частотной характеристики. Однако эта толщина непостоянна и зависит от размеров оформления и мощности головки. Отметим также, что изменение толщины стенок существенно сказывается на значениях вибраций в частотном диапазоне до 1000 Гц. На более высоких частотах амплитуды вибраций стенок незначительны. Увеличение толщины стенок оказывает наибольшее влияние на вибрации верхней и задней стенок.

Другой способ борьбы с вибрациями заключается в нанесении вибропоглощающих покрытий на внутреннюю поверхность корпусов оформлений. На низких частотах при нанесении покрытия не только увеличивается на 5—10 дБ уровень звукового давления, но и частотная характеристика становится более равномерной. В качестве таких вибропоглощающих покрытий применяют, например, мастику ВМ, пластмассу «Агат» и т. д.

В акустических системах часто заполняют внутренний объем звукопоглощающим материалом. Этот материал обязательно должен быть пористым. В этом качестве чаще всего применяют хлопчатобумажную, минеральную, стеклянную, капроновую вату, поролон, войлок и т. д. Толщина звукопоглощающего покрытия, например, из ваты должна быть не менее 20—30 мм. Чтобы нанести на внутренние поверхности панели звукопоглощающий материал, из него делают маты. На куске марли раскладывают вату ровным слоем, накрывают другим куском марли и равномерно простегивают суровой ниткой. Маты крепят к внутренним поверхностям оформления гвоздями или шурупами. Если нет возможности внести много звукопоглощающего материала, то им покрывают заднюю стенку и углы ящиков. При достаточном количестве звукопоглощающего материала его наносят на все внутренние поверхности, за исключением панелей с головками. Для предохранения от попадания звукопоглощающего материала на головку рекомендуется одевать специальный мешочек из акустически прозрачной ткани, например бязи.

Удобно применять в качестве звукопоглощающего материала поролон (пенополиуретан) толщиной 20—50 мм. Отметим, что если укреплять звукопоглощающий материал на расстоянии 20—50 мм от внутренних поверхностей оформления, звукопоглощение на низких частотах увеличивается Хорошие результаты дает подвешивание звукопоглотителя в виде валика поперек ящика. Размещать

звукопоглощающий материал в корпусе фазоинвертора, вблизи внутреннего отверстия фазоинвертора, нужно с осторожностью, так как чрезмерно сильное демпфирование может привести к прекращению действия фазоинвертора. Размещение же этих материалов в отверстии или трубе фазоинвертора недопустимо. Вообще же количество звукопоглощающего материала должно быть таким, чтобы не превышался критерий допустимости активных акустических потерь в оформлении и заполнении.

Что касается значений общих активных потерь в акустической системе, включающих в себя активные потери в головке, корпусе, материале заполнения, трубе фазоинвертора, то они могут быть найдены по зависимости модуля полного электрического сопротивления от частоты (Z-характеристики) головки без оформления и, последовательно, головки в закрытом оформлении без заполнения, с заполнением и в фазоинверторном оформлении того же объема и с той же головкой.

Значение активных акустических потерь $r_{пот}$ находится из выражения $r_{пот}=\omega_{01}m/Q=s/(\omega_0 Q)$. Однако практически ищут значение $r_{пот}/m=\omega_0/Q$ или $r_{пот}/s=1/(\omega_0 Q)$, поскольку нахождение точных значений m и s — довольно сложная задача, а нахождение значений ω_0 и Q незатруднительно (по Z-характеристикам). Методика измерения этих величин приведена далее.

Значения потерь для различных случаев соответственно равны:

для головки без оформления: акустические потери $r_0/m_0=\omega_0/Q_м$, полные потери $(r_0+r_{вн})/m_0=\omega_0/Q$;

для головки в закрытом оформлении: без заполнения $(r_0+r_{вн}+r_{0ф})/m_0=\omega_{01}/Q_{01}$, с заполнением $(r_0+r_{вн}+r_{0ф}+r_{зап})/m_0=\omega'_{01}/Q'_{01}$.

Здесь ω'_{01}, Q'_{01} — резонансная частота и добротность головки в закрытом оформлении с заполнением.

Для фазоинверторных систем $(r_0+r_{вн}+r_{0ф}+r_{тр})/s=1/(\omega_ф Q_ф)$.

Однако целесообразно находить не абсолютное значение активных потерь, а их отношение к потерям в головке. В таком виде и представлены критерии допустимости потерь, например в закрытом и фазоинверторном оформлениях. Значения их приведены в соответствующих главах.

Для закрытого оформления допустимое значение активных акустических потерь определяется из выражения (39), для случая АС с ФИ это значение определяется как $(r_{вн}+r_0)/(r_{0ф}+r_{зап}+r_{тр})>10$ где $r_{тр}$ — активные акустические потери в трубе или отверстии фазоинвертора.

КОНСТРУКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗАДАННОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Очень важно обеспечить необходимую направленность АС. Действительно, предположим, что система имеет, как это часто бывает, тупую характеристику направленности на низких частотах и острую — на высоких. Тогда даже при весьма равномерной частотной характеристике на оси мы получим под некоторым углом к ней частотную характеристику с большим спадом в сторону высоких частот. Разумеется, что получить удовлетворительное звучание от такой системы для всех направлений, кроме осевого, невозможно. Поэтому на практике применяют разные способы расширения характеристик направленности на высших частотах. Простейший из них — применение малых по сравнению с длиной волны излучаемого звука головок. Так, если головка работает в поршневом диапазоне, ее направленность изменяется незначительно. В некоторых зарубежных моделях АС для расширения характеристик направленности на высоких частотах одиночных больших головок применяют рассеиватели (рис. 79) или головки с секторными рупорами (рис. 80). Однако среднечастотные и тем более высокочастотные одиночные головки являются слишком маломощными, и для того чтобы подводить к ним большую мощность на средних и высоких частотах, приходится применять по нескольку оловок, соединенных электрически последовательно или параллельно.

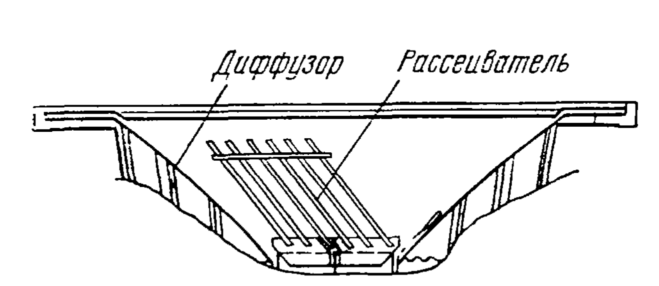


РИС. 79. Конструкция высокочастотной головки с рассеивателем

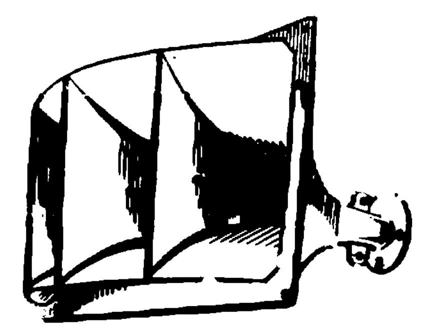


РИС. 80. Высокочастотная головка с секторным рупором

Такая группа головок будет обладать, как мы увидим дальше, довольно острой направленностью. Чтобы она не слишком сильно влияла на качество звучания, иногда располагают головки группами, вертикально одна над другой. При этом обостряется направленность только в вертикальной плоскости, что не причиняет большого вреда, если ось группы располагают на высоте ушей слушателей. Направленность же в горизонтальной плоскости при этом не отличается от направленности одиночной головки. Но такое расположение не всегда удобно конструктивно, так как при этом «раздувается» высота системы. Направленность группы излучателей

может быть определена исходя из основной теоремы направленности, гласящей, что направленность группы $R_г(\theta)$ равна произведению из направленности, входящей в нее одиночной головки $R_0(\theta)$ на направленность $R_1(\theta)$ рассматриваемой группы, но составленной из точечных, т. е. ненаправленных излучателей. Так, для линейной группы, т. е. составленной из ненаправленных излучателей, расположенных по прямой линии

$$R_1(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi nd}{\lambda}\sin\theta\right)}{n\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta\right)},$$

где θ — угол между перпендикуляром к линии излучателей и направлением на точку наблюдения, n — число головок, d — расстояние между соседними излучателями, λ — длина волны излучаемого звука.

Как видно, направленность группы частотно-зависима, не говоря уже о том, что зависит также от частоты и направленность составляющих ее головок. Это приводит к обострению направленности с повышением частоты. Для борьбы с этим применяют включение головок группы через электрические фильтры (см. далее), рассчитанные так, что по мере повышения частоты одни за другими отключаются крайние головки группы, чтобы сохранить примерно постоянным отношение nd/λ.

Часто для расширения характеристики направленности располагают головки в горизонтальной плоскости по дуге круга. На рис. 81 изображены получающиеся при этом характеристики направленности при угловом размере дуги 60° (рис. 81,*а*), 90° (рис. 81,*б*). Цифры над каждой характеристикой обозначают отношение диаметра группы к длине волны излучаемого звука. Эти характеристики вычислены по довольно громоздкой формуле

$$R_1 = \frac{1}{2m+1}\sqrt{\left\{\sum_{k=-m}^{k=+m}\cos\left[\frac{\pi D}{\lambda}\cos(\theta+k\alpha)\right]\right\}^2 + \rightarrow}$$

$$\overline{\rightarrow + \left\{\sum_{m=-k}^{k=+m}\sin\left[\frac{\pi D}{\lambda}\cos(\theta+k\alpha)\right]\right\}^2}\,.$$

где θ — угол между радиусом группы, проведенным через точку симметрии дуги и направлением на точку наблюдения, $2m+1$ — число головок, предполагаемое нечетным, D — диаметр группы α — центральный угол между соседними головками.

Это выражение выведено для группы, составленной из ненаправленных головок. Так же, как и для линейной группы предотвратить обострение направленности при повышении частоты можно с помощью электрических фильтров, отключающих одни за другими крайние головки группы.

Каждым из описанных способов можно добиться существенного расширения характеристик направленности. Однако малона-

правленные акустические системы, предназначенные для воспроизведения стереофонических программ, обеспечивают удовлетворительное воспроизведение их лишь на сравнительно небольшой площади (см. рис. 82), примыкающей к перпендикуляру, восстановленному к середине базы — линии, соединяющей центры си-

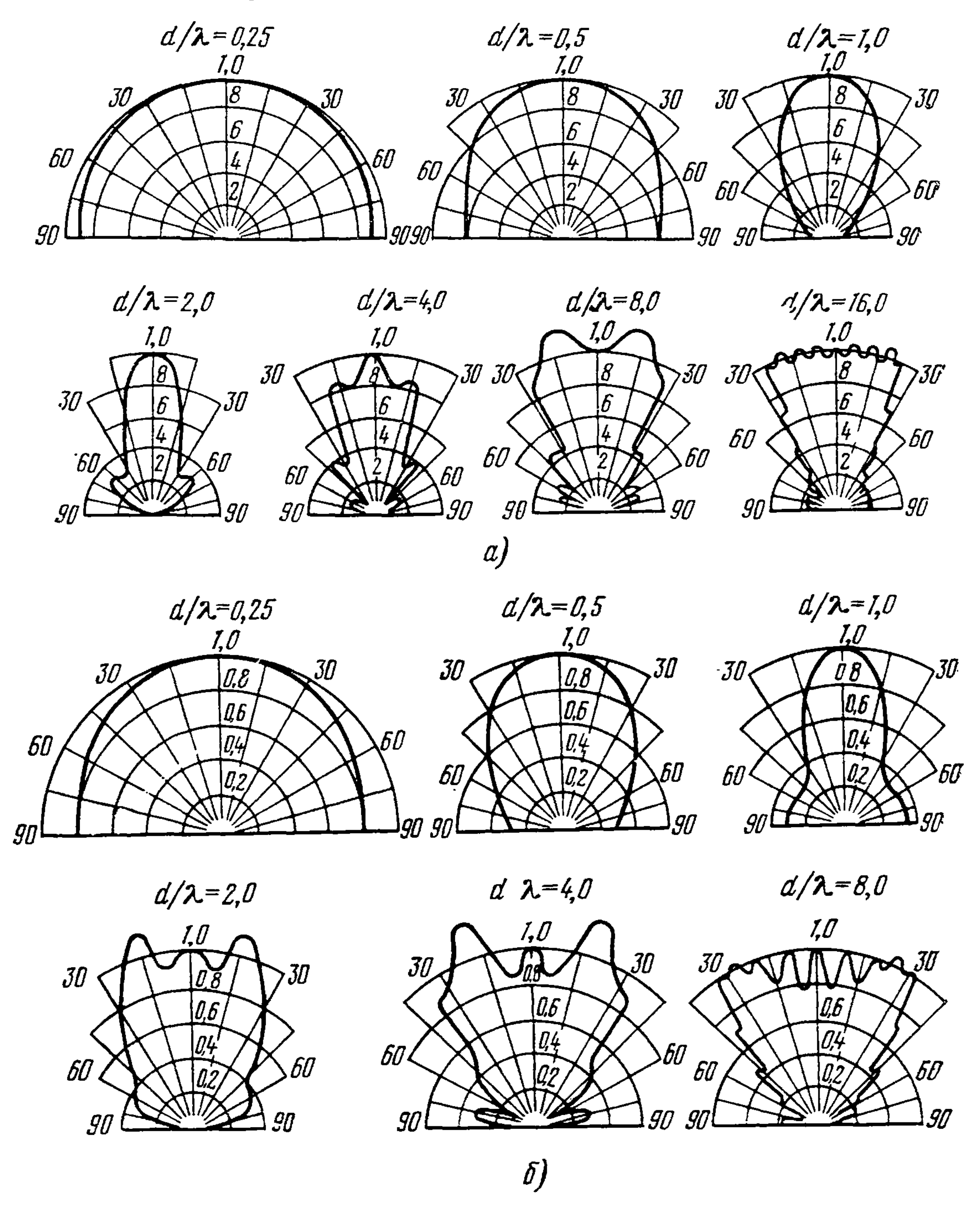


РИС. 81. Характеристики направленности головок при разных угловых размерах дуги

стем стереофонической пары. А если учесть, что наилучшее впечатление у слушателей получается при нахождении на расстоянии от базы, примерно равном ее длине, то ясно, что площадь удовлетворительного восприятия стереофонического эффекта мо-

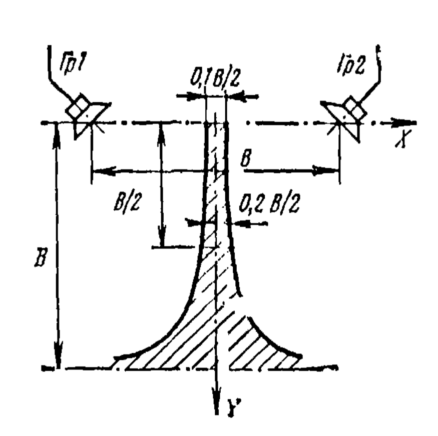


РИС. 82. Зона стереофонического восприятия ненаправленных акустических систем

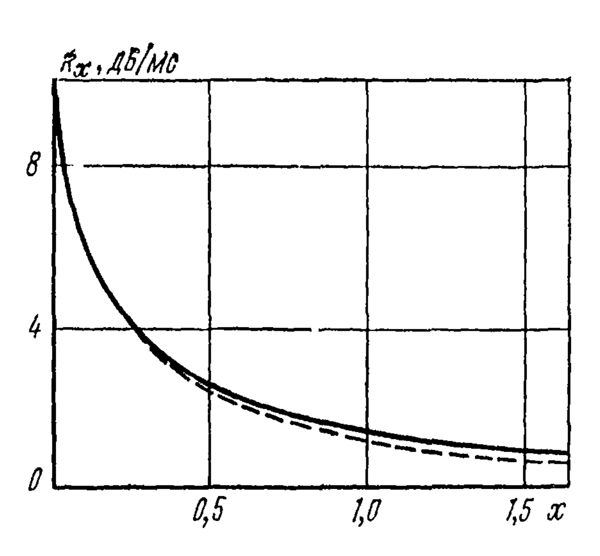


РИС. 83. Зависимость k_x от x

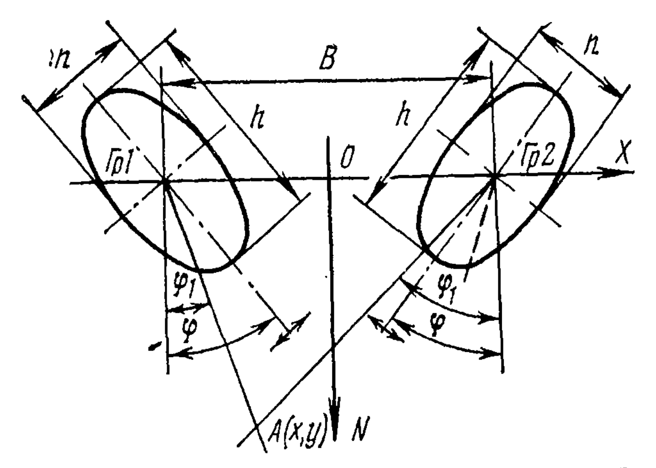


РИС. 84. Образование разности уровней и разности времени

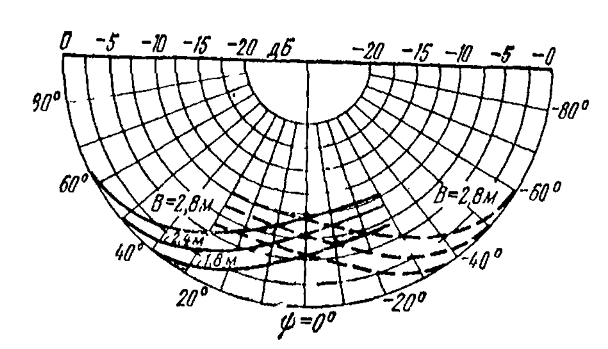


РИС. 85. Оптимальные формы характеристик направленности АС при расстоянии до слушателя 2 м и длине базы от 1,8 до 2,8 м

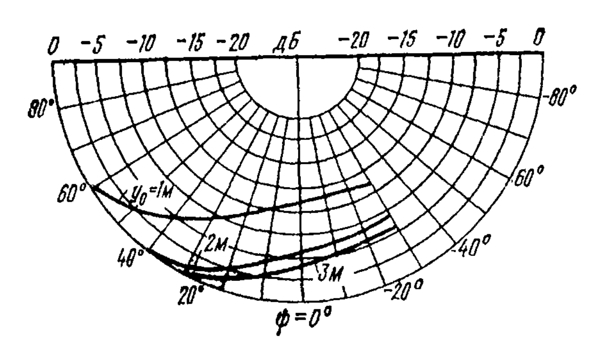


РИС. 86. Оптимальные формы характеристик направленности АС для разных расстояний до слушателя при базе длиной 1,8 м

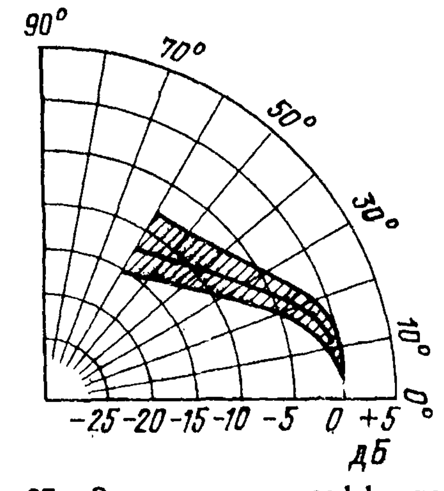


РИС. 87. Зависимость коэффициента использования площади прослушивания от направленности громкоговорителей для разных углов пересечения акустических осей

жет содержать в себе лишь очень небольшое число слушательских мест. Советскими изобретателями А. В. Борисенко, Ю. А. Ковалгиным, А. П. Коротченко и Ю. П. Берендюковым предложен интересный способ расширения площади, на которой может наблюдаться стереофонический эффект*. Его психоакустической основой является тот факт, что направление на кажущийся при стереофоническом воспроизведении источник звука зависит как от разности уровней звукового давления ΔL, пришедших от стереофонической пары акустических систем к ушам слушателей, так и разности времен прихода звука $\Delta\tau$. При этом ΔL и $\Delta\tau$ могут компенсировать друг друга, т. е. являться эквивалентными. Так, если кажущийся источник звука подбором какого-то значения ΔL выведен из срединной точки базы, то при подборе какого-то значения $\Delta\tau$ этот источник может быть возвращен в первоначальную точку. Количественно взаимная компенсация ΔL и $\Delta\tau$ может быть выражена через коэффициент эквивалентности: $k_x = \Delta L/\Delta\tau_R$. Индекс x обозначает, что значения k_x зависят от бокового смещения x от оси базы, параллельно ей. Зависимость k_x от x представлена на рис. 83.

Каждая точка слушания характеризуется значением $\Delta\tau$, разностью расстояний l_1 и l_2 до акустических систем стереофонической пары и значением ΔL, определяемым той же разностью расстояний и формой характеристики направленности АС, и углом разворота φ их осей (рис. 8.4). Очевидно, что, подбирая форму характеристики направленности и угол разворота осей, можно добиться для каждой точки слушания сохранения стереофонического эффекта. Количественно условие этого сохранения выражается уравнением

$$k_x \Delta\tau + \Delta L + \Delta L_R = 0. \qquad (51)$$

Здесь ΔL — разность уровней звукового давления из-за разности расстояний l_1 и l_2 до акустических систем, а

$$\Delta L_R = R(\theta_1) - R(\theta_2),$$

разность уровней за счет того, что звук от пары акустических систем, приходящий в точку слушания, излучается под разными углами к оси каждой АС. Отсюда

$$R(\theta_1) - R(\theta_2) = \frac{l_1 - l_2}{c} 10^3 k_x + 20 \lg \frac{l_1}{l_2}. \qquad (52)$$

Это соотношение хорошо выполняется для всех положений слушателя, не слишком близких к базе.

Отметим, что соблюдение условий (51) и (52) не обязательно во всем частотном диапазоне. Достаточно их соблюдение в диапазоне от 300—600 Гц до 3000—5000 Гц, определяющим стереофонический эффект.

---

* Дальнейшее изложение настоящей главы дается в соответствии с рекомендациями, изложенными более подробно в книге: Л. М. Кононович и Ю. А. Ковалгин. Стереофоническое воспроизведение звука. — М. Радио и связь, 1981.

Расчет по выражению (52) показывает, что оно удовлетворяется не одной формой характеристики направленности, а множеством этих форм. На рис. 85 представлены оптимальные формы характеристики направленности, правой (сплошная линия) и левой (пунктирная) АС, расположенных на базах равной длины (от 1,8 до 2,8 м) при расстоянии слушателей от базы 2 м, а на рис. 86 — оптимальные формы характеристик направленности для разных расстояний слушателей от базы 1,8 м.

Для расширения площади восприятия стереофонического эффекта можно применять и АС, не направленные в горизонтальной плоскости, но направленные в вертикальной, с расположением их выше или ниже ушей слушателей. Использование площади прослушивания показано на рис. 87.

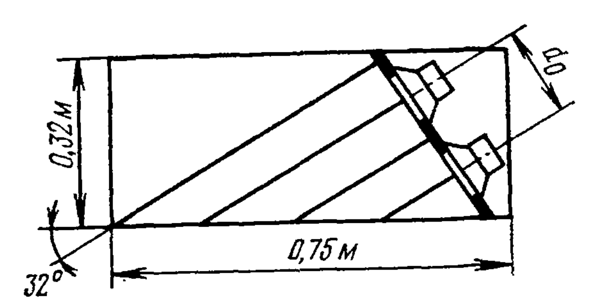
Реализация требуемых характеристик направленности может быть осуществлена только за счет использования специальных принципов конструирования АС или, точнее, их среднечастотных звеньев. Наиболее употребительными конструкциями в настоящее время являются линейные группы (где центры головок расположены по прямой) и акустические линзы. Для примера приведем данные линейной группы, составленной из головок диаметром 0,1 м.

Таблица 3

Параметр	Размер базы, м		
	1,8	2,4	3,0
Направленность, определяемая как спад уровня на дБ под углом, °	 6 40	 8 50	 10 60
Необходимое число головок в группе для достижения требуемой направленности: в полосе 350—700 Гц	—	6	—
в полосе 1000 Гц	—	4	—
в полосе 1000—2000 Гц	—	1—2	—

Как видно, по мере повышения частоты число головок должно уменьшаться, что можно выполнить путем отключения крайних головок с помощью электрических фильтров (что, вообще говоря, не очень практично). В приведенном примере конструктивная длина группы составит 6×0,1=0,6 м. Однако эта длина может быть уменьшена, как и для групп другой длины, в половину, если группа будет вплотную прижата к стене. Такой же результат получается для групп, направленных в вертикальной плоскости, при их установке на полу.

Примером устройства акустической линзы является конструкция, показанная на рис. 88. Она представляет собой набор достаточно жестких параллельных металлических пластин, располагаемых под некоторым углом к стереофонической базе. Для направления, совпадающего с плоскостью пластин, линза не оказывает существенного влияния, но для других направлений, как это уже пояснялось ранее, из-за разности фаз колебаний от выходов линзы до точки наблюдения направленность обостряется. Поэтому, например, для получения результатов, приведенных в табл. 3, при использовании линзы достаточно в указанных там полосах иметь число головок соответственно 3,3 и 2 и наклон пластин линзы от 40° (для базы 1,8 м) до 30° (для базы 3 м). При таком небольшом числе головок электрическое отключение одной или двух из них можно осуществлять с помощью шунтирующего отключаемые головки конденсатора.



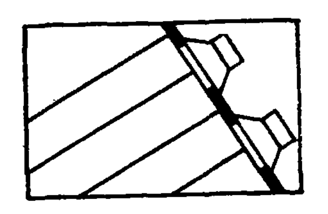


Рис. 88. Устройство акустической линзы

В заключение отметим, что термин «линза» применяется по аналогии с оптическими линзами, где концентрация или рассеивание света получается за счет того, что лучи проходят в различных точках линзы разные пути благодаря чему изменяется фаза световых колебаний для каждого из лучей.

РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

В многополосных АС головки, предназначенные воспроизводить разные части частотного диапазона, включаются через так называемые разделительные фильтры. Их назначение заключается в том, чтобы пропускать к каждой головке напряжение только нужных частот. Эти фильтры различают по крутизне спада за пределами высшей или низшей граничной частоты. Обычно применяют фильтры с крутизной спада 6, 12 или 18 дБ на октаву. По схеме их разделяют на фильтры для двухполосных и трехполосных АС. Исходными данными для расчета являются частота раздела и сопротивление головки в рабочей полосе фильтра. На рис. 89,*а*, *б*, *в* приведены схемы фильтров с крутизной спада соответственно 6, 12 и 18 дБ/октава. В верхней части каждого из рисунков приводится схема фильтра для двухполосной АС, а в нижней — для трехполосной. На каждом рисунке приведена так-

же формула для определения элементов этих фильтров. Емкости, индуктивности и сопротивления соответственно даны в фарадах, генри и омах. Конденсаторы фильтров выбирают из номенклатуры выпускаемых промышленностью изделий. Больше всего подходят для разделительных фильтров конденсаторы типа МБГО, параметры которых приведены в приложении 6.

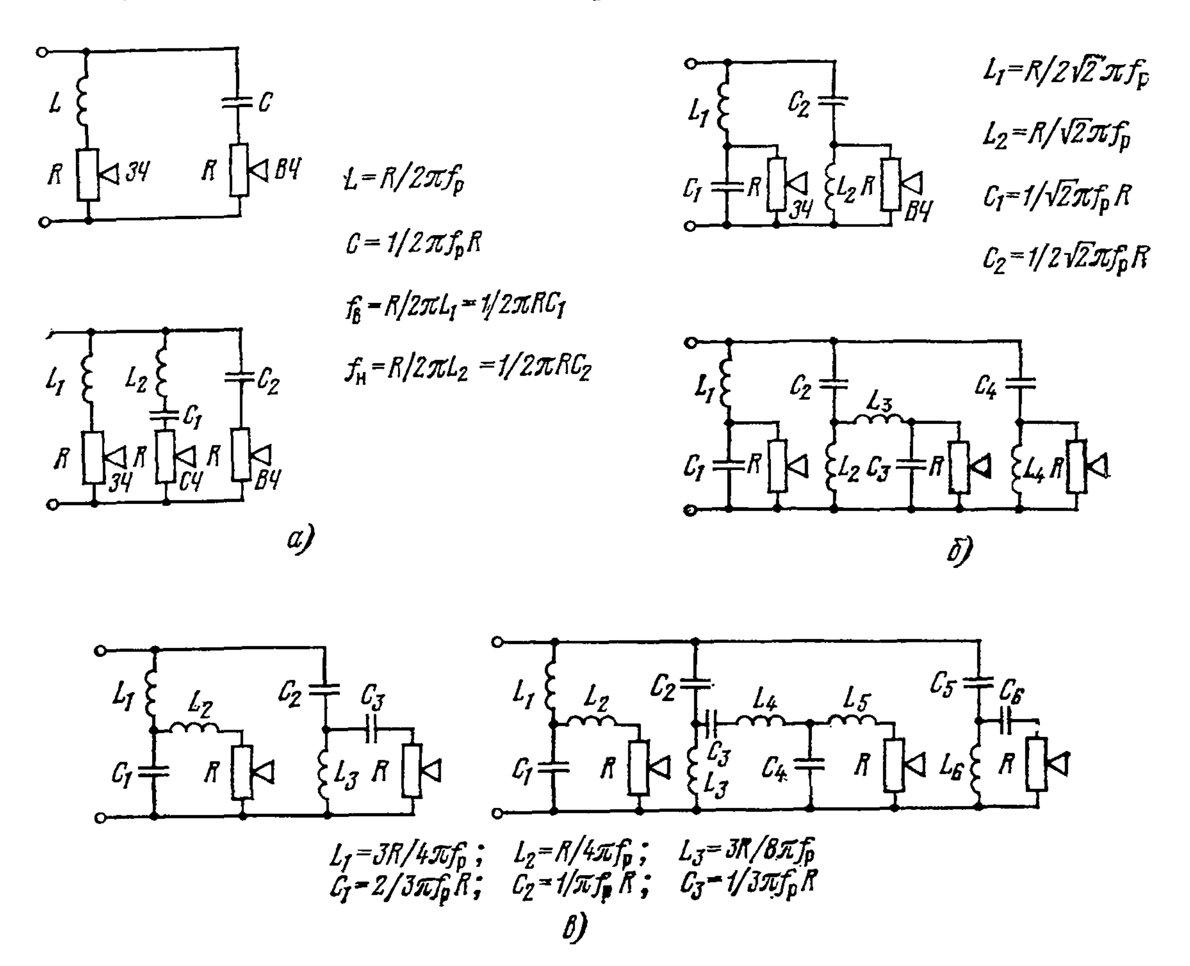


РИС. 89. Схемы разделительных фильтров

Что касается катушек индуктивности, то их изготавливают путем намотки без железного сердечника во избежание искажений, обусловленных перемагничиванием. Практически оптимальная в смысле максимума отношения индуктивности катушки к ее активному сопротивлению конструкция получается, когда внутренний диаметр цилиндрической обмотки вдвое больше ее высоты h, а внешний диаметр в 4 раза больше h и в 2 раза больше внутреннего диаметра. При этих условиях значение $h=\sqrt{L/R}/0{,}866$ мм (L, мкГн, R, Ом), длина провода $l=187{,}3\sqrt{Lh}$, число витков $N=19{,}88\sqrt{L/h}$, диаметр провода (без изоляции) $d=0{,}84\cdot h/\sqrt{N}$ мм, масса провода $m=(h^3/21{,}4)\cdot 10^3$ кг.

Пример. Определить данные катушки индуктивностью 3,37 мГн разделительного фильтра, нагруженного головкой сопротивлением 15 Ом. Активное сопротивление рассчитываемой катушки выбираем равным 5% от сопротивления головки. Это соотношение

можно считать вполне приемлемым. Тогда $R=0{,}05\cdot15=0{,}75$ Ом, откуда $L/R=3{,}37\cdot10^3/0{,}75=4500$. Высота обмотки $h=\sqrt{4500}/0{,}866=$ $=24{,}5$ мм, длина провода $l=187{,}3\sqrt{3{,}37\cdot10^3\cdot24{,}5}=5{,}35\cdot10^4$ мм$=$ $=53{,}5$ м, число витков $N=19{,}88\sqrt{3{,}37\cdot10^3/24{,}5}=233$ витка, диаметр провода $d=0{,}84\cdot24{,}5/\sqrt{233}=1{,}35$ мм, масса провода $m=$ $=(24{,}5^3/21{,}4)\cdot10^3=0{,}69$ кг.

Естественно, полученные числа должны быть округлены, и в первую очередь диаметр провода, до ближайшего стандартизованного диаметра. Окончательно индуктивности подгоняют путем измерения на мостике, отматывая по нескольку витков обмотки, намотанной с некоторым превышением числа витков сравнительно с рассчитанным. Катушки можно наматывать на пластмассовые, деревянные или картонные каркасы. Применяется и бескаркасная намотка (рис. 90), для того чтобы катушка не развалилась, витки после намотки каждого слоя промазывают клеем БФ-4. Если есть возможность, то для полимеризации клея катушку запекают в термостате при температуре 140—160° С в течение 1 ч. Если такой возможности нет, то катушка должна быть высушена при комнатной температуре в течение суток. Иногда провод, в качестве которого предпочитают марку ПЭЛ, бывает покрыт каким-либо маслом. Тогда перед намоткой или в ее процессе провод нужно протереть ваткой, смоченной смесью из 50% спирта и 50% бензина или, в крайнем случае, чистым бензином. Собранный и смонтированный фильтр, т. е. его конденсаторы и катушки, размещают на полочке, укрепленной внутри корпуса АС. Разумеется, все электрические соединения должны быть хорошо пропаяны во избежание шорохов и тресков, могущих возникнуть из-за плохих контактов.

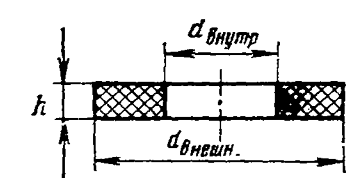


РИС. 90. Схема бескаркасной намотки катушки

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В предыдущих разделах мы ознакомились с основными параметрами, которые характеризуют работу АС. Эти параметры определяются с помощью соответствующих измерений, которые могут быть разделены на две основные группы: электроакустические и электрические. Первые из них хотя и несут наибольшую информацию, вместе с тем и наиболее сложны, так как для своего выполнения требуют не только сложной аппаратуры, но и специальных условий измерений, которыми могут располагать только хорошо оснащенные специализированные лаборатории, а именно, заглушенными звукомерными камерами. Устройство таких камер весьма дорогостояще, особенно если нужно измерять в них АС, начиная с самых низких частот. В этом случае камера должна иметь

большие размеры, хотя и меньшие по сравнению с длиной волны на этих частотах, но сравнимые с ними (даже на частоте 50 Гц длина волны около 7 м). Стены, потолок и пол камеры должны быть отделаны звукопоглощающим покрытием, в качестве которого преимущественно используют клинья из тонкого стекловолокна (рис. 91). И большие размеры камеры, и ее звукопоглощающая отделка служат одной цели — исключить в камере отражения и тем самым создать в ней условия свободного пространства. В таких камерах и определяют основные параметры АС, а именно: частотные характеристики как осевые, так и под различными уг-

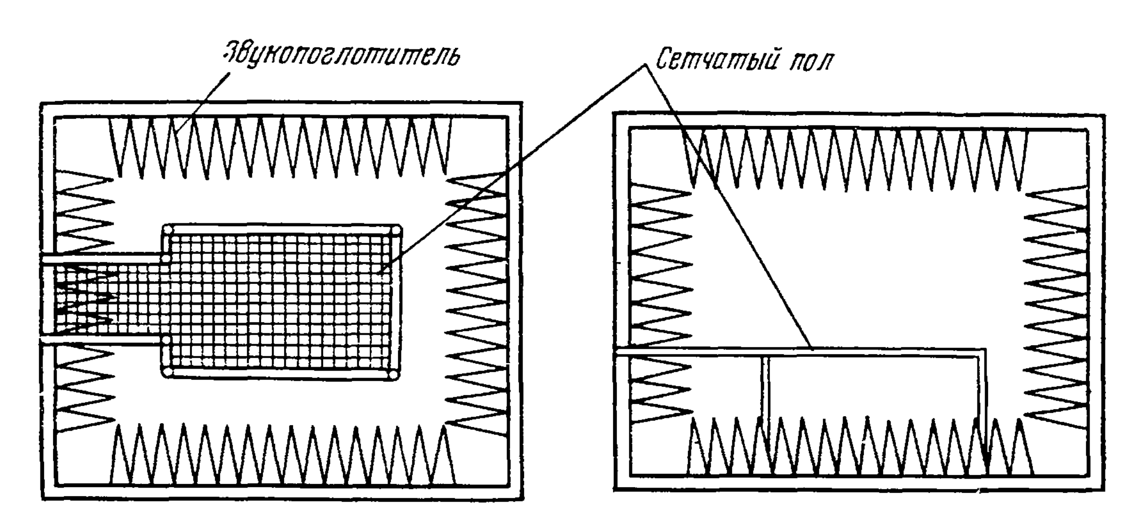


РИС. 91. Устройство измерительной заглушенной камеры

лами к оси, их неравномерности, стандартное звуковое давление (характеристическую чувствительность), среднее звуковое давление, характеристики направленности, нелинейные искажения и др. Типичная схема измерительной установки приведена на рис. 92.

Напряжение от звукового генератора *1* подается на мощный усилитель *2*, выходное напряжение которого подводится к АС *3*. Звуковое давление, развиваемое ею, воздействует на измерительный микрофон *4*, имеющий весьма ровную частотную характеристику, т. е. чувствительность, мало зависящую от частоты. Выходное напряжение с микрофона подается на микрофонный усилитель *5*, к которому подключено устройство автоматической записи характеристик *6*. Устройство записи имеет механизм, протягивающий бумажную ленту, и пишущее устройство (перо), перемещающееся перпендикулярно направлению движения ленты. Механизм протягивания обычно жестко скреплен с валом конденсатора переменной емкости звукового генератора, при вращении

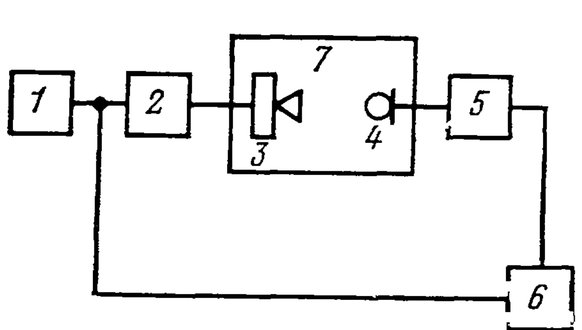


РИС. 92. Схема измерения частотных характеристик

которого и изменяется (примерно по логарифмическому закону) частота генератора. Таким образом, и перемещение ленты происходит по логарифмическому закону в соответствии с изменением частоты. Перемещение пишущего механизма (пера), благодаря соответствующей схеме микрофонного (или вспомогательного) усилителя, происходит пропорционально логарифму входного напряжения микрофонного усилителя и тем самым логарифму звукового давления, воздействующего на микрофон. В результате запись на бланке автоматического устройства происходит в двойном логарифмическом масштабе как по оси ординат (в децибелах), так и по оси абсцисс. Если на этом бланке записывать не только осевые частотные характеристики головки или АС, но характеристики под разными углами (рис. 93), то это даст возможность судить о направленности этой головки или АС.

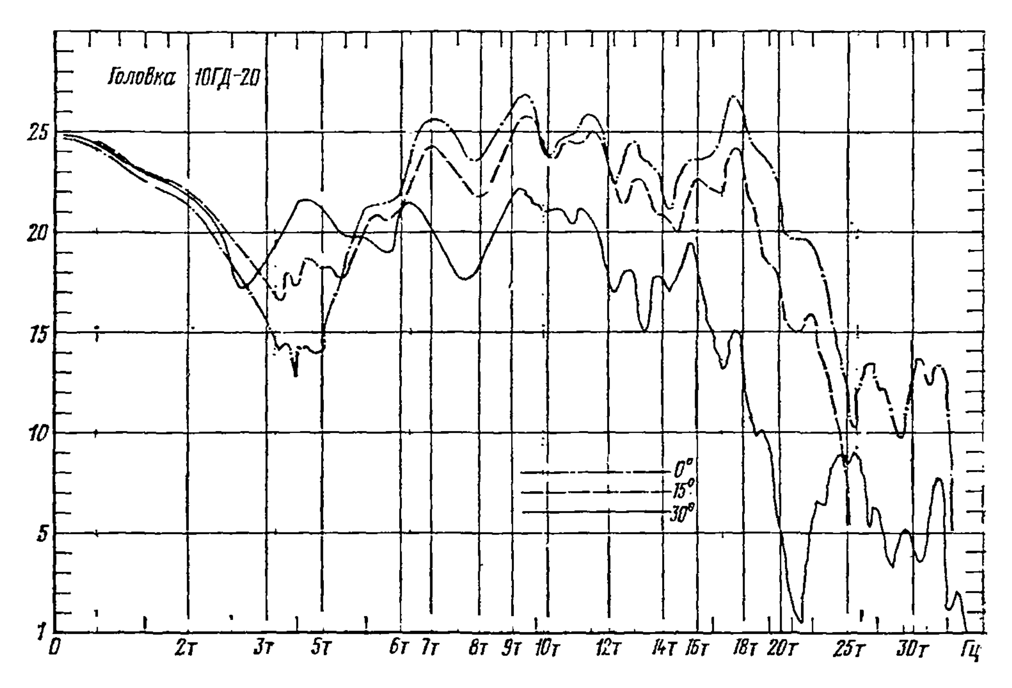


РИС. 93. Частотные характеристики головки 10ГД-20 под разными углами

Если теперь вместо пишущего устройства включить анализатор гармоник, то можно определить и нелинейные искажения.

Частотные характеристики и характеристики направленности можно определять не только на чистых тонах, т. е. на синусоидальных сигналах, но и на полосах шума. Наиболее распространенными в настоящее время шумовыми сигналами для измерений являются 1/3 октавные полосы шума. Следует отметить, что наиболее употребительным расстоянием от испытуемой АС до измерительного микрофона является расстояние 1 м. Однако иногда берут и другие расстояния, но результаты измерений на них приводятся к 1 м. Более полно методика электроакустических измерений устанавливается государственным стандартом 16122—78 «Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний».

Как указывалось, проведение электроакустических испытаний доступно лишь хорошо оснащенным специализированным лабораториям. Более доступны измерения электрические. Они дают возможность проверить АС на отсутствие дребезжания, определить ее сопротивление, резонансную частоту, добротность, эквивалентный объем. Для выполнения электрических измерений необходимо иметь лишь звуковой генератор, усилитель и электронный вольтметр. Включая звуковой генератор на испытуемую АС через усилитель и изменяя непрерывно частоту генератора в диапазоне АС при напряжении, подводимом к системе, можно путем прослушивания установить наличие или отсутствие дребезжания у испытуемой системы. Электрическое сопротивление АС на какой-то частоте измеряется с помощью магазина сопротивлений так, что на нем подбирают такое сопротивление, что при переключении вольтметра с него на испытуемую АС показания вольтметра не меняются. Выставленному при этом на магазине сопротивлению и равен модуль электрического сопротивления головки, открытой, закрытой АС. Резонансная частота АС определяется по частоте, на которой модуль электрического сопротивления АС максимален.

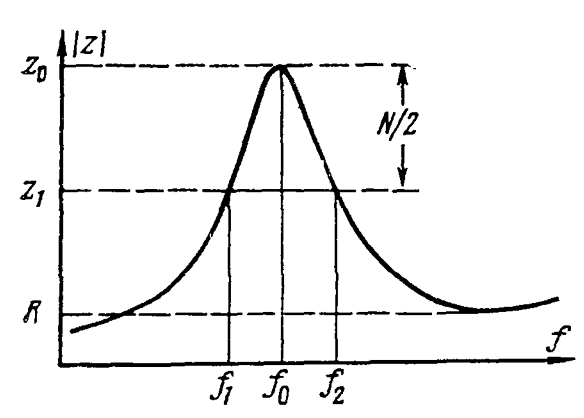


РИС. 94. Схема определения добротности головки и акустической системы

Для определения эквивалентного объема головки последовательно определяют ее резонансную частоту без оформления f_0 и далее резонансную частоту f_{01} этой же головки, помещенной в закрытое оформление известного объема V. Тогда эквивалентный объем $V_э$ может быть определен по формуле $V_э = V \cdot (f^2_{01}/f^2_0 - 1)$. Например, если резонансная частота головки составляет 30 Гц, а при помещении ее в закрытый объем (100 л) — 45 Гц, то эквивалентный объем головки будет составлять $V_э = 100 \cdot (45^2/30^2 - 1) = 125$ л.

Несколько сложнее определяется добротность. Для этого (рис. 94) находим сопротивление испытуемой головки на постоянном токе (или на весьма низкой частоте) z_1 и на резонансной частоте z_0. Далее находят путем изменения частоты те ее значения f_1, f_2, при которых сопротивление $z_2 = \sqrt{z_1 z_0}$. Тогда искомое значение добротности будет

$$Q = \sqrt{\frac{z_1}{z_0}}\,\frac{f_1 f_0}{(f_1^2 - f_0^2)} = \sqrt{\frac{z_1}{z_0}}\,\frac{f_1 f_0}{(f_1 - f_0)(f_1 + f_0)}.$$

Например, пусть сопротивление АС на весьма низкой частоте составляло 4 Ом, а на резонансной частоте 30 Гц — 16 Ом и на частоте 20 Гц равно $\sqrt{4 \cdot 16} = 8$ Ом. Тогда

$$Q = \sqrt{\frac{4}{16}} \cdot \frac{20 \cdot 30}{(30 - 20) \cdot (30 + 25)} = \frac{6}{11} = 0{,}55.$$

Отметим, что такое определение резонансной частоты и добротности справедливо для головок открытых и закрытых АС. Для систем же с фазоинверторами и с пассивными излучателями простое понятие добротности не имеет места и поэтому его не имеет смысла определять. Однако по частотной характеристике модуля полного электрического сопротивления можно судить о степени эффективности АС с ФИ и АС с ПИ, как это указывалось в соответствующих параграфах.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. МЕТОД ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

Для анализа АС, кроме метода электромеханических аналогий, описанного § 1, часто используется при расчетах и метод электроакустических аналогий. По этому методу аналогом звукового давления p считают напряжение U, аналогом колебательной скорости V — плотность тока q, а аналогом объемной скорости колебаний VS — ток i.

Комбинации из акустических и механических систем также можно рассматривать с помощью электроакустических аналогий. При переходе от механических систем к акустическим все механические сопротивления $z_м$ необходимо заменить на соответствующие им акустические $z_а$, а силы F и скорости V соответственно на давления p и объемные скорости $V \cdot S = V_{об}$.

Покажем, как это делается. С одной стороны, $z_м = F/V$. С другой стороны, $F = pS_д$; $V_{об} = V \cdot S_д$, где $S_д$ — эффективная площадь диффузора головки.

Акустическое сопротивление $z_а = p/V_{об}$. Следовательно, $Z_а = F/(S^2_д V S^2_д) = F/(VS^2_д) = z_м/S^2_д$. Исходя из последнего равенства, можно показать, что $m_м = m_а S^2_д$, $s_м = s_а S^2_д$, $r_м = r_а S_д$, где $m_м$, $s_м$, $r_м$ — соответственно механические масса, упругость и сопротивление. Обычно индексы «м» опускают.

Применяя эти соотношения, можно при расчете, например, АС с ФИ или АС с ПИ значительно упростить расчетные выражения. Действительно, используя акустический аналог механоакустической системы, можно рассчитать указанные АС с любым соотношением площадей диффузора головки и отверстия фазоинвертора или площади пассивного излучателя, и это никак не усложнит расчета поскольку все параметры с механической стороны уже пронормированы относительно площади диффузора головки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ВЫВОД ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ $k = \dot{x}_ф/\dot{x}_0$ ИЗ (40)

Для нахождения величины k рассмотрим упрощенную схему акустического аналога АС с ФИ, изображенного на рис. 50. Обозначим полное акустическое сопротивление подвижной системы головки z_0, полное акустическое сопротивление разветвления «1» — $z_р$, входное акустическое сопротивление АС с ФИ — $z_ф$, входное акустическое сопротивление головки в закрытом оформлении — $z_з$.

Тогда суммарная объемная колебательная скорость АС с ФИ

$$\dot{x}_ф = \frac{B\,l\,i}{z_ф}\,\frac{z_р}{s/j\,\omega} = \frac{z_р}{s/j\,\omega}\,\frac{B\,l\,U}{(R_г + R_к)\left(\dfrac{B^2 l^2}{(R_г + R_к)\,S_д^2} + z_ф\right)},$$

а объемная колебательная скорость на поверхности головки

$$\dot{x}_0 = \frac{B\,l\,U}{(R_г + R_к)\left(\dfrac{B^2 l^2}{(R_г + R_к)\,S_д^2} + z_з\right)}.$$

Отсюда

$$k = \frac{\dot{x}_ф}{\dot{x}_0} = \frac{\left[\dfrac{B^2 l^2}{(R_г + R_к)\,S_д^2} + z_з\right] z_р}{\left[\dfrac{B^2 l^2}{(R_г + R_к)\,S_д^2} + z_ф\right] s/j\,\omega}. \qquad (1)$$

Напишем развернутые выражения для всех сопротивлений, входящих в (1):

$$z_0=\left[\frac{B^2 l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+r_0\right]+j\left(\omega m_0-\frac{S_0}{\omega}\right);$$

$$z_в=\left[\frac{B^2 l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+r_0\right]+j\left(\omega m_0-\frac{s_0}{\omega}-\frac{s}{\omega}\right);$$

$$\frac{z_р}{s/j\,\omega}=(r+j\,\omega\,m)/[r+j\,(\omega\,m-s/\omega)];$$

$$z_р=\frac{s}{j\,\omega}\;\frac{r+j\,\omega\,m}{r+j\,(\omega\,m-s/\omega)};\quad z_ф=z_0+z_р.$$

Тогда

$$k=\frac{\left(\dfrac{B^2 l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+r_0\right)+j\,(\omega\,m_0-s_0/\omega-s/\omega)\,r}{\left\{\left(\dfrac{B^2l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+r_0\right)+j\,(\omega\,m_0-s_0/\omega)+\dfrac{s}{j\,\omega}\,\dfrac{r+j\,\omega m}{r+j\,(\omega m-s/\omega)}\right\}}\cdot\frac{r+j\omega\,m}{r+j(\omega m-s/\omega)}. \tag{2}$$

Проводим с (2) ряд несложных преобразований

$$k=\frac{\left[1+j\left(\dfrac{\omega\,m_0-s_0/\omega-s/\omega}{\dfrac{B^2 l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+r_0}\right)\right]}{\left[1+j\left(\dfrac{\omega m_0-s_0/\omega}{\dfrac{B^2 l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+r_0}\right)+j\left(\dfrac{s/\omega_0}{\dfrac{B^2 l^2}{(R_г+R_к)S_д^2}+r_0}\right)\right]\cdot\dfrac{(r+j\,\omega\,m/r)}{\left[1+j\left(\dfrac{\omega m-s/\omega}{r}\right)\right]}}\times$$

$$\times\frac{(1+j\,\omega\,m/r)}{\left[1+j\left(\dfrac{\omega m-s/\omega}{r}\right)\right]}. \tag{3}$$

Учитывая, что $Q_ф=\omega_ф m/r_ф$, запишем (3) в виде

$$k=\frac{\left[1+j\,Q\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}-\dfrac{\omega_0}{\omega}-\dfrac{s}{s_0}\,\dfrac{\omega_0}{\omega}\right)\right]}{\left[1+jQ\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}-\dfrac{\omega_0}{\omega}\right)-jQ\dfrac{s}{s_0}\,\dfrac{\omega_0}{\omega}\,\dfrac{1+jQ_ф\dfrac{\omega}{\omega_ф}}{1+jQ_ф\left(\dfrac{\omega}{\omega_ф}-\dfrac{\omega_ф}{\omega}\right)}\right]\left[1+jQ_ф\left(\dfrac{\omega}{\omega_ф}-\dfrac{\omega_ф}{\omega}\right)\right]}$$

Для дальнейших упрощений введем обозначения: $t=\omega/\omega_0$; $n=s/s_0$; $l=\omega_0/\omega_ф$. Тогда

$$k=\frac{\left[1+j\,Q\left(\dfrac{t^2-n-1}{t}\right)\right](1+j\,t\,l\,Q_ф)}{\left[1+jQ\left(t-\dfrac{1}{t}\right)-j\,\dfrac{n}{t}\,Q\,\dfrac{1+j\,t\,l\,Q_ф}{1+jQ_ф\left(tl-\dfrac{1}{tl}\right)}\right]\left[1+jQ_ф\left(tl-\dfrac{1}{tl}\right)\right]}.$$

И окончательно

$$|k|=\sqrt{\frac{\{1-QQ_{\Phi}\,l\,(t^2-n-1)\}^2+\to}{\left\{1+QQ_{\Phi}\left[nl-\left(t-\frac{1}{t}\right)\left(t\,l-\frac{1}{tl}\right)\right]\right\}^2+\to}\;\frac{\to+\left\{t\,l\,Q_{\Phi}+Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)\right\}^2}{\to+\left\{Q\left(\frac{t^2-n-1}{t^2}\right)+Q_{\Phi}\left(t\,l-\frac{1}{tl}\right)\right\}^2}}. \qquad (4)$$

При настройке фазоинвертора на резонансную частоту головки выражение (4) упрощается и принимает вид

$$|k|=\sqrt{\frac{\{1-QQ_{\Phi}\,(t^2-n-1)\}^2+\left\{t\,Q_{\Phi}+Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)\right\}^2}{\left\{1+QQ_{\Phi}\left[n-\left(t-\frac{1}{t}\right)^2\right]\right\}^2+\left\{Q\left(\frac{t^2-n-1}{t}\right)+Q_{\Phi}\left(t-\frac{1}{t}\right)\right\}^2}}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ВЫВОД ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ $k=\dot{x}_{п}/\dot{x}_0$ (47)

Для нахождения величины k рассмотрим упрощенную схему акустического аналога АС с ПИ, изображенную на рис. 63.

Обозначим полное акустическое сопротивление подвижной системы головки z_0, полное акустическое сопротивление разветвления (в точке *1*) — $z_р$, входное акустическое сопротивление АС с ПИ — $z_п$ и входное акустическое сопротивление АС без ПИ — $z_з$.

Тогда суммарная объемная колебательная скорость АС с ПИ

$$\dot{x}_{п}=\frac{B\,l\,i}{Z_{п}}\,\frac{z_р}{s_к/j\,\omega}=\frac{B\,l\,U}{(R_г+R_к)\left[\frac{B^2\,l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+z_п\right]}\,\frac{z_р}{s_к/j\,\omega},$$

а объемная колебательная скорость АС без ПИ

$$\dot{x}_0=\frac{B\,l\,U}{(R_г+R_к)\left[\frac{B^2\,l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+z_з\right]}.$$

Отсюда

$$k=\frac{\dot{x}_п}{\dot{x}_0}=\frac{\left[\frac{B^2\,l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}-z_з\right]z_р}{\left[\frac{B^2\,l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+z_п\right]s_к/j\,\omega}. \qquad (1)$$

Напишем теперь развернутые выражения для всех сопротивлений, входящих в (1)

$$z_з=\left[\frac{B^2\,l^2}{(R_г+R_к)\,S_д^2}+r_0\right]+j\,[\omega\,m_0-s_0/\omega];$$

$$z_з = \left[\frac{B^2 l^2}{(R_г + R_к)\, S_д^2} + r_0\right] + j\,[\omega\, m_0 - s_0/\omega - s/\omega];$$

$$z_р = \frac{s_к}{j\,\omega}\;\frac{r + j\,(\omega\, m - s/\omega)}{r + j\,(\omega\, m - s/\omega - s_0/\omega)}\;;$$

$$z_п = z_0 + z_р.$$

Тогда выражение (1) примет вид

$$k = \frac{\left\{\left[\dfrac{B^2 l^2}{(R_г + R_к)\, S_д^2} + r_0\right] + \rightarrow \quad \rightarrow + j\left[\omega\, m_0 - \dfrac{s_0}{\omega} - \dfrac{s_к}{\omega}\right]\right\}[r + j\,\omega\, m]}{\left\{\left[\dfrac{B^2 l^2}{(R_г + R_к)\, S_д^2} + r_0\right] + j\left[\omega m_0 - \dfrac{s_0}{\omega}\right] + \rightarrow \quad \rightarrow + \dfrac{s_к}{j\,\omega}\;\dfrac{r + j\,(\omega m - s/\omega)}{r + j\,(\omega m - s/\omega - s_к/\omega)}\right\}[r + j\,(\omega m - s/\omega - s_к/\omega)]}. \qquad (2)$$

Для дальнейших упрощений введем следующие обозначения: $t = \omega/\omega_0$, $n = s_к/S$, $l = \omega_0/\omega_п$, $p = s_к/s$, $Q_п = \omega_п m/r_п = s/\omega_п r_п$, где $\omega_п$ — резонансная круговая частота настройки пассивного излучателя, $Q_п$ — добротность пассивного излучателя. Проводя с (2) ряд несложных преобразований, получаем

$$k = \frac{\left[1 + j\,Q\left(\dfrac{t^2 - n - 1}{t}\right)\right]\left[1 + j\,Q_п\left(t\,l - \dfrac{1}{t\,l}\right)\right]}{\left[1 + jQ\left(\dfrac{t^2 l^2 - n - 1}{tl}\right)\right]\left[1 + jQ\left(\dfrac{t^2 - 1}{t}\right)\right] - jntQ\,\dfrac{1 + jQ_п\left(\dfrac{t^2\, l^2 - 1)}{t}\right)}{1 + jQ_п\left(\dfrac{t^2 l^2 - p - 1}{tl}\right)}}\,.$$

Окончательное выражение для k может быть записано в виде

$$|k| = \sqrt{\frac{\left[1 + QQ_п\left(\dfrac{t^2 - n - 1}{t}\right)\left(\dfrac{t^2\, l^2 - 1}{tl}\right)\right]^2 + \rightarrow \quad \rightarrow + \left[Q\left(\dfrac{t^2 - n - 1}{l}\right) + Q_п\left(\dfrac{t^2\, l^2 - 1}{tl}\right)\right]^2}{\left\{1 + QQ_п\left[\dfrac{t^2 n}{t}\left(\dfrac{t^2\, l^2 - 1}{t\,l}\right) - \left(t - \dfrac{1}{t}\right)\left(\dfrac{t^2\, l^2 - p - 1)}{tl}\right)\right]\right\}^2 + \rightarrow \quad \rightarrow + \left[Q_п\left(\dfrac{t^2\, l^2 - n - 1}{tl}\right) \mp Q\left(\dfrac{t^2 - n - 1}{t}\right)\right]^2}}\,.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. ПАРАМЕТРЫ КОНДЕНСАТОРОВ МБГО (МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ, ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫЕ, ОДНОСЛОЙНЫЕ)

Номинальная емкость, мкФ	Номинальное напряжение, В				
	160	300	400	500	600
	Габаритные размеры, мм				
0,25	—	—	—	—	25×31×11
0,5	—	—	—	25×31×11	25×31×16
1,0	—	25×31×11	25×31×16	25×31×21	25×31×26
2,0	25×31×16	25×31×21	25×31×26	50×46×11	50×46×26
4,0	25×31×21	50×46×11	50×46×16	50×46×21	50×46×26
10,0	50×46×16	50×46×21	50×46×31	50×46×41	50×46×56
20,0	50×46×31	50×46×41	50×46×61	50×46×76	—
30,0	50×46×56	50×46×56	—	—	—

Примечания: 1. Конденсаторы на большие номинальные напряжения имеет смысл применять только в тех случаях, когда нет номиналов конденсаторов на меньшие емкости и напряжения.

2. Приведенные размеры не учитывают выступающие за них контакты и лапки крепления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белов И. Ф., Дрызго Е. Д., Суханов Ю. И.** Справочник по бытовой приемно-усилительной аппаратуре. — М.: Сов. радио, 1980.
2. **Болотников И. М.** Громкоговорители. — М.: Искусство, 1971.
3. **Виноградова Э. Л.** Конструирование громкоговорителей со сглаженными частотными характеристиками. — М.: Энергия, 1978. — 49 с.
4. **Иофе В. К., Яппольский А. А.** Расчетные графики и таблицы по электроакустике. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1954. — 522 с.
5. **Иофе В. К.** Электроакустика. — М.: Связьиздат, 1954. — 184 с.
6. **Иофе В. К., Корольков В. Г., Сапожков М. А.** Справочник по акустике. — М.: Связь, 1979. — 312 с.
7. **Иофе В. К., Лизунков М. В.** Взаимный подбор головок громкоговорителей и оформлений для акустических систем. — Техника средств связи. Сер. ТРПА, 1979, вып. 1, с. 61—70.
8. **Кононович Л. М., Ковалгин Ю. А.** Стереофоническое воспроизведение звука. — М.: Радио и связь, 1981. — 184 с.
9. **Лизунков М. В.** О рациональном выборе параметров фазоинверторных акустических систем. — Техника средств связи. Сер. ТРПА, 1979, вып 1, с. 71—82.
10. **Лизунков М. В.** Методика расчета акустической системы с пассивным излучателем. — Техника кино и телевидения, 1981, № 12, с. 26—29.
11. **Римский-Корсаков А. В.** Электроакустика. — М.: Связь, 1978. — 272 с.
12. **Сапожков М. А.** Электроакустика. — М.: Связь, 1978. — 272 с.
13. **Фурдуев В. В.** Акустические основы вещания. — М.: Связьиздат, 1960. — 320 с.
14. **Беранек А.** Акустические измерения. — М.: ИЛ, 1952. — 626 с.
15. **Шифман Д. Х.** Громкоговорители. — М.—Л.: Энергия, 1965. — 248 с.
16. **Эфрусси М. М.** Громкоговорители и их применение. — М.: Энергия, 1976. — 144 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ